

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 596 310**

51 Int. Cl.:

B09C 1/06 (2006.01)

F23G 7/14 (2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **08.12.2006 PCT/GB2006/004591**

87 Fecha y número de publicación internacional: **14.06.2007 WO07066125**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **08.12.2006 E 06820460 (1)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **10.08.2016 EP 1973676**

54 Título: **Método y aparato para descontaminar tierra contaminada**

30 Prioridad:

10.12.2005 GB 0525193

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

05.01.2017

73 Titular/es:

**THE UNIVERSITY COURT OF THE UNIVERSITY
OF EDINBURGH (100.0%)
1-7 Roxburgh Street
Edinburgh EH8 9TA, GB**

72 Inventor/es:

**GERHARD, JASON;
TORERO, JOSE;
PIRONI, PAOLO;
SWIZTER, CHRISTINE y
REIN, GUILLERMO**

74 Agente/Representante:

DE ELZABURU MÁRQUEZ, Alberto

ES 2 596 310 T3

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

DESCRIPCIÓN

Método y aparato para descontaminar tierra contaminada

5 La presente invención se refiere a un método para descontaminar o limpiar tierra que está contaminada por un material combustible. En particular, pero no exclusivamente, la presente invención se refiere a un método mejorado para la descontaminación de zonas de tierra contaminada con líquidos en fase no acuosa (NAPL).

10 La contaminación de aguas subterráneas y aguas superficiales mediante malas prácticas históricas de eliminación de residuos y las continuas liberaciones accidentales de productos químicos industriales peligrosos, afecta a miles de lugares en todo el mundo. Entre los más comunes y problemáticos de estos productos químicos están los líquidos orgánicos inmiscibles, particularmente los líquidos en fase no acuosa (NAPL). Los NAPL que son más ligeros que el agua se conocen como LNAPL; éstos incluyen gasolina y gasóleo. Los NAPL que son más densos que el agua se conocen como DNAPL; éstos incluyen disolventes clorados tales como tricloroetileno (TCE) y tetracloroetileno (PCE), bifenilos policlorados (PCB) y mezclas complejas de hidrocarburos (tales como alquitrán de hulla y creosotas). Los NAPL plantean una amenaza grave y a largo plazo a la calidad del agua, debido a su prevalencia, toxicidad, persistencia y resistencia a los intentos habituales de descontaminación.

15 La agencia de medio ambiente del Reino Unido "United Kingdom Environment Agency" ha indicado que existen hasta 20.000 lugares en Inglaterra y Gales afectados por la contaminación por NAPL, y que necesitan tratamiento bajo las leyes de protección del medioambiente del Reino Unido "United Kingdom Environmental Protection Laws". De hecho, se estima que sólo los disolventes clorados representan aproximadamente 30% de los casos de contaminación de aguas subterráneas en Inglaterra y Gales. En los Estados Unidos, el Departamento de Defensa de EE.UU. estima que aproximadamente 11% de sus más de 3.000 lugares afectados por los disolventes tienen zonas
20 fuentes de DNAPL que permanecen bajo la superficie. Las zonas fuente son regiones bajo la superficie que contienen líquidos inmiscibles (NAPL), que pueden persistir durante décadas o incluso siglos, y que siguen liberando contaminación en fase disuelta en concentraciones en aguas subterráneas que están usualmente muy por encima de las que se considera que presentan un riesgo para la salud humana. Además, estos compuestos son típicamente volátiles y, por lo tanto, también se reparten en la fase aérea presente en la tierra por encima de la capa freática, desde donde estos vapores pueden migrar por encima del suelo y dentro de los edificios. Como tales, las zonas
25 fuentes de NAPL son responsables de la contaminación persistente de la tierra, agua y aire.

Una amplia variedad de industrias han producido NAPL durante el pasado siglo, que incluyen subproductos y residuos derivados de: alquitrán de hulla derivado de la fabricación de gas (a partir del carbón), creosotas de las
30 operaciones de conservación de la madera, y disolventes usados en el desengrasado de componentes eléctricos y para la limpieza en seco. La contaminación bajo la superficie que se produce por estos líquidos orgánicos inmiscibles se produce en los lugares de fabricación, transporte, almacenamiento, uso y eliminación. En particular, en el pasado, era común y práctica permitida eliminar estos materiales vertiéndolos en el suelo después del uso. Sólo en los últimos 20 años se ha reconocido el riesgo de los NAPL, se ha regulado su manipulación, y se han
35 buscado formas de abordar la descontaminación de lugares contaminados con NAPL. Sin embargo, los NAPL son muy persistentes bajo la superficie, y difíciles de abordar satisfactoriamente con las técnicas de descontaminación actuales. Cuando se recuperan en la superficie, son peligrosos de manipular y costosos de tratar o eliminar de manera segura.

40 Los materiales subproductos/residuales industriales forman típicamente depósitos líquidos o líquidos/gaseosos, aunque en el caso de ciertos materiales, también pueden estar presentes depósitos sólidos. Una situación típica en la que pueden estar presentes contaminantes sólidos es en lugares en los que se han fabricado explosivos químicos orgánicos, y en los que se han producido vertidos de procesos de producción y/o procesos de fabricación. Los vertidos implicados en la fabricación de los explosivos orgánicos de 2,4,6-trinitrotolueno (TNT), 2,4-dinitrotolueno (DNT), hexahidro-1,3,5-trinitro-1,3,5-triazina (RDX) y octahidro-1,3,5,7-tetranitro-1,3,5,7-tetrazocina (HMX) son
45 particularmente problemáticos. Esto es porque, en circunstancias en las que las temperaturas ambientales son significativamente inferiores que las temperaturas del agua de vertido (no inusual – las aguas subterráneas están típicamente a 10°C), los explosivos pueden precipitar de la disolución y crear un material separado en fase sólida en la tierra.

Otro contaminante orgánico encontrado como fase sólida bajo la superficie es el residuo del purificador, que resulta
50 del enfriamiento y purificación de gas recién fabricado del carbón (una práctica común desde el principio hasta la mitad de los 1900). Durante el proceso, las impurezas se retiraban haciendo pasar el gas a través de "lechos purificadores" formados por cal o astillas de madera impregnadas con limaduras de hierro. Los lechos del purificador se cargarían con el tiempo con alquitrán y otros materiales y se volverían inservibles. Este residuo del purificador (al que también se hace referencia como "residuo en forma de caja") tenía una tendencia a encenderse
55 espontáneamente si se dejaba descubierto y se enviaba del lugar a vertederos o se usaba para rellenar zonas bajas en el lugar. El residuo del purificador se encuentra típicamente como una mezcla oscura de astillas de madera con piezas de sólidos (típicamente alquitrán) mezcladas.

Se han ofrecido varios métodos para tratar los NAPL, con diverso éxito. Por ejemplo, el modo habitual de tratar zonas de tierra contaminada con NAPL es la excavación y eliminación de los residuos, conocido de otro modo como

“excavar y verter”. Esto consiste en identificar y desenterrar el suelo contaminado y transportarlo a un vertedero, donde se deposita. Sin embargo, esta práctica simplemente mueve el problema de la contaminación de una zona a otra, al tiempo que se aumenta a menudo el riesgo de exposición llevando los NAPL por encima del suelo. Esta práctica se desaprueba ahora como insostenible, y recientemente se ha vuelto mucho más costosa en el Reino Unido bajo la nueva legislación y los impuestos sobre vertidos.

El primer método in situ (es decir, dentro del suelo) que se ha usado en un esfuerzo para ocuparse de los NAPL es la técnica de “bombeo y tratamiento”. Esto implica instalar un pozo de recuperación de aguas subterráneas corriente abajo de la zona de la fuente de NAPL. El bombeo continuo del pozo de recuperación captura los compuestos en fase disuelta que emanan de la zona de la fuente. El agua contaminada recuperada debe tratarse en la superficie. Sin embargo, esta técnica es esencialmente una estrategia de contención para la nube de fase disuelta creada por los NAPL, y se ha mostrado ineficaz para la descontaminación de la zona de la fuente. Como tales, deben a menudo funcionar indefinidamente, simplemente para limitar la expansión de las aguas subterráneas contaminadas.

Existen muchas tecnologías de tratamiento para tratar los compuestos en fase disuelta en las aguas subterráneas. Sin embargo, como el “bombeo y tratamiento”, éstas no tratan la zona de la fuente que “alimenta” continuamente con compuestos a estas nubes de aguas subterráneas. Existen muchas menos tecnologías para tratar los propios NAPL en la zona de la fuente.

Se han usado diversos tratamientos químicos in situ en un intento de retirar los NAPL de los lugares contaminados. Por ejemplo, en una técnica, se bombean tensioactivos o alcoholes en el suelo a través de un pozo de inyección, y ayudan en la disolución y movilización de los NAPL, que pueden luego extraerse por bombeo de un segundo pozo corriente abajo. La mezcla resultante de NAPL y agua contaminada puede separarse luego en la superficie en fases acuosas y no acuosas para tratamiento y/o incineración. Sin embargo, esta técnica tiene varias desventajas. En particular, implica la adición continua de aditivos químicos costosos y a veces peligrosos; puede ser particularmente ineficaz en algunos entornos bajo la superficie; puede conducir a la removilización de DNAPL hacia abajo, lo que empeora la situación; implica fluidos que son difíciles de separar de los NAPL o de reciclar; y recupera grandes volúmenes de fluidos que necesitan tratamiento.

Un tratamiento químico más para la retirada in situ de NAPL de los lugares contaminados implica su oxidación. Por ejemplo, puede bombarse permanganato potásico en un lugar contaminado, que luego reacciona con los NAPL mediante una reacción de oxidación, para transformar los NAPL en compuestos no peligrosos. Sin embargo, el éxito de esta técnica puede ser limitado debido a la reacción que forma simultáneamente sólidos minerales que bloquean el espacio poroso que rodea los NAPL, impidiendo de este modo un contacto adicional entre los agentes reaccionantes. Además, el material orgánico que se produce de manera natural en la tierra ejerce una gran demanda de oxidante, necesiéndose oxidante adicional a inyectar. El uso de grandes volúmenes de oxidante es típicamente costoso.

También se han usado técnicas biológicas en un esfuerzo para descontaminar lugares contaminados por NAPL. Tales técnicas de biodescontaminación implican típicamente añadir nutrientes y una fuente de alimentación orgánica a la tierra contaminada, tales que los grupos de bacterias en la tierra se multiplican e interactúan para degradar los compuestos peligrosos. La biodescontaminación ex situ implica desenterrar la tierra contaminada y tratarla en un reactor o en pilas en la superficie de la tierra. La biodescontaminación in situ se ha puesto en marcha para tratar compuestos en fase disuelta corriente abajo de la zona de la fuente, actuando como estrategia para la contención de la nube, pero no reduciendo el volumen de los NAPL. Ha habido esfuerzos recientes para hacer posible la biodescontaminación dentro de la misma zona de la fuente; aunque se ha mostrado algún éxito en algunos experimentos de laboratorio, esto tiene todavía que demostrarse en el terreno.

Existen varios problemas con la biodescontaminación de las zonas fuente de NAPL. La continua entrada de aditivos (sustratos orgánicos y nutrientes) puede hacer costoso el tratamiento. Además, es necesario obtener un equilibrio específico de lugar de bacterias, alimento y nutrientes para cada lugar contaminado. La técnica de biodescontaminación es por lo tanto específica de lugar. Otro problema asociado con las técnicas de biodescontaminación es el de “bioacumulación”, en el que el espacio poroso cerca de los NAPL y los pozos de bombeo se bloquean debido a una excesiva proliferación microbiana. Además, no todos los lugares contaminados tienen las bacterias necesarias presentes de manera natural en el lugar. En estas situaciones, los agentes degradantes biológicos conocidos también necesitarían ser inyectados, en un procedimiento conocido como “bioalimentación”. Sin embargo, en ciertas jurisdicciones esta práctica está rechazada activamente, y en muchos casos no está permitida, debido a restricciones en la implantación de organismos no nativos.

Las técnicas de tratamiento químico y biológico in situ (es decir, bajo la superficie) descritas anteriormente implican todas la inyección de fluidos bajo la superficie corriente arriba de la zona de la fuente, y dependen del contacto posterior entre los productos químicos y los NAPL. Sin embargo, un problema significativo con todas de tales técnicas de inyección de fluidos es que lograr la descarga deseada de la fuente puede ser problemático. La desviación de fluidos se produce a menudo cuando el fluido inyectado tiende a fluir alrededor de los NAPL, limitando de este modo su exposición, y de este modo el contacto con una parte del producto químico inyectado. Esto se produce principalmente dos razones: los NAPL tienden a permanecer en lentes de baja permeabilidad de material bajo la superficie (por ejemplo, sedimentos o arcillas), que de manera natural desvían el flujo lejos de ellas, y el

propio NAPL bloquea los espacios porosos, provocando que el agua o un fluido inyectado fluya más fácil y rápidamente alrededor de la zona de la fuente. Además, la dilución de los fluidos inyectados puede provocar que sus concentraciones disminuyan de tal modo que se reduce su eficacia.

5 Otro enfoque que se ha empleado en un esfuerzo para erradicar los lugares contaminados de NAPL implica las técnicas de descontaminación térmica, que incluyen descargas de vapor, calentamiento por resistencia eléctrica (ECH) y calentamiento por conducción eléctrica (ECH). Los beneficios de las tecnologías de descontaminación térmica son que pueden reducir la masa de NAPL en cuestión de meses a años (en comparación con de años a décadas para las tecnologías más pasivas discutidas anteriormente), y que pueden ser eficaces en medios de baja permeabilidad, ya que la conducción de calor está generalmente menos afectada que el flujo de fluidos por las propiedades hidráulicas.

10 La descarga de vapor implica la inyección de vapor bajo la superficie, para volatilizar y reducir la viscosidad de los NAPL, ayudando de este modo su a su movilización hacia un pozo de retirada. Las técnicas de ERH y ECH implican la implantación de electrodos grandes dentro del suelo (en la zona de la fuente), y un calentamiento prolongado del agua y/o la propia tierra. Los métodos térmicos calientan típicamente bajo la superficie hasta una temperatura de aproximadamente 100°C. Haciendo esto, no se pretende destruir los contaminantes in situ sino cambiar su fase y/o propiedades para que puedan moverse y recuperarse. Un mecanismo primario de descontaminación es volatilizar los compuestos NAPL para que puedan recogerse de la fase aérea bajo la superficie o en la superficie del suelo. También es común la recogida del líquido, que se moviliza debido a su viscosidad reducida. En algunos casos, algunos compuestos NAPL pueden degradarse térmicamente, ya que el calor absorbido causa una degradación endotérmica (pirólisis) o reacción con agua (hidrólisis). Sin embargo, estas técnicas muestran diverso éxito y tienen un inconveniente significativo. Específicamente, las técnicas requieren un gran y continuo aporte de energía para lograr y mantener una temperatura dada. De este modo, estas técnicas demuestran a menudo ser prohibitivamente costosas.

15 El documento de patente DE 20 20 612 A1 describe un método para descontaminar una tierra contaminada con material combustible. En este método, se crea un orificio de perforación buscando la profundidad donde está localizado el petróleo contaminante, siendo el final del orificio de perforación una cámara de combustión en la que el petróleo drena y es quemado con la adición de un oxidante.

20 En resumen, por lo tanto, los métodos de la técnica anterior para descontaminar (o limpiar) lugares contaminados con NAPL tienen generalmente limitaciones significativas en términos de los periodos de tiempo durante los que funcionan, la eficacia de las técnicas usadas y los costes en los que se incurre.

25 Está entre los objetos de las realizaciones de la invención, obviar o mitigar al menos uno de los inconvenientes asociados con la técnica anterior.

Más propósitos y objetos de la invención se volverán evidentes a partir de una lectura de la siguiente memoria descriptiva.

30 Conforme a un primer aspecto de la presente invención, se proporciona un método para descontaminar tierra contaminada con un material combustible, comprendiendo el método las etapas de:

- localizar un volumen subterráneo de material combustible en la tierra que ha de descontaminarse, y
- encender el material combustible para hacer que el material entre en combustión en un proceso de combustión sin llama, y de este modo descontaminar la tierra.

40 Las realizaciones preferidas de la invención se describen en las reivindicaciones dependientes.

También se describen en la presente memoria métodos asociados para ayudar a entender la invención, pero éstos no forman parte de la invención que se reivindica.

45 La invención proporciona de este modo un método mediante el cual la tierra contaminada con materiales combustibles puede limpiarse o descontaminarse mediante la combustión de los materiales in situ. Esto supera los problemas asociados con las técnicas anteriores de limpieza, tales como "excavar y verter". La combustión del material puede ser autosostenible por cuanto puede ser necesario suministrar solamente energía suficiente para encender el material; una vez encendido, la combustión del material puede continuar mientras que haya combustible (el material combustible) y oxígeno suficientes para que la combustión tenga lugar. Esto contrasta con, por ejemplo, los procedimientos conocidos de descontaminación térmica, que necesitan un aporte continuo de energía.

50 Los materiales que incluyen muchos NAPL comunes, así como algunos contaminantes orgánicos sólidos, son inflamables y contienen una energía sustancial. Cuando se queman, liberan una cantidad significativa de calor. Por ejemplo, el calor de combustión (HOC) del TCE y del clordano en relación con el de la madera son de 90% y 300% respectivamente; los neumáticos troceados, con un HOC de solamente 5% del de la madera, han combustionado exitosamente en proyectos de recuperación de residuos. La combustión implica una reacción exotérmica autosostenida de un material combustible en presencia de un oxidante, oxidando (y de este modo destruyendo) el

material combustible en el proceso. Cuando el material combustible se introduce dentro de un medio poroso, el medio poroso tiene un impacto altamente beneficioso en la combustión: el sólido actúa como almacén de energía y luego alimenta con esa energía de nuevo la reacción. Este mecanismo de retroalimentación de la energía significa que es posible un proceso de combustión de autopropagación eficiente para las condiciones que de otra manera conducen a la extinción. Las aplicaciones en una incineración ex situ, quemadores porosos y una recuperación de petróleo mejorada indican un potencial significativo, pero el concepto de combustión in situ para la descontaminación bajo la superficie es novedoso.

Se entenderá que el material combustible es subterráneo por cuanto está por debajo del nivel del suelo o dentro del subsuelo, y puede comprender un fluido y/o un sólido, o cualquiera de sus combinaciones. Sin embargo, se espera que la mayor parte de los materiales esté predominantemente en una fase de fluido. También se entenderá que el subsuelo es típicamente poroso y puede comprender tierra o similares, residiendo los líquidos combustibles típicamente en los poros definidos entre las partículas sólidas de la tierra (o en el caso de entornos de roca fracturada, residiendo en la red de fracturas entre bloques de roca/arcilla y/o en los espacios porosos de la propia matriz de roca/arcilla).

Puede generarse un frente de combustión después de la ignición del material combustible y puede desplazarse hacia afuera, lejos de un punto de ignición y a través del volumen de material combustible. El frente de combustión puede seguir un camino definido por factores que incluyen la forma de un volumen de fluido y un camino definido a lo largo de los poros interconectados en la tierra. El frente de combustión debe seguir la distribución (es decir, el camino) del material combustible lejos del punto de ignición sin que el operador (por encima del suelo) conozca con antelación la distribución específica (caminos). De este modo, el proceso será también autoguiado.

Preferiblemente, el método comprende el seguimiento de la combustión del material. El seguimiento de la combustión del material puede comprender las etapas de seguir uno o más parámetros, que incluyen la temperatura en la tierra contaminada con el material combustible, en una pluralidad de ubicaciones. El seguimiento de la combustión puede comprender también el seguimiento de subproductos del proceso de combustión, tales como los constituyentes y/o volúmenes de subproductos gaseosos que resultan de la combustión del material. El método puede comprender el seguimiento de la combustión del material en tiempo real, y de este modo durante el proceso de combustión. En muchas circunstancias, las técnicas de descontaminación de NAPL existentes se evalúan solamente en el campo mediante la cartografía de la distribución del NAPL y las concentraciones de gas/agua corriente abajo antes y después del tratamiento, y mirando la diferencia para determinar la "eficacia" de la tecnología. El seguimiento en tiempo real proporciona ventajas significativas sobre métodos anteriores. Alternativamente, o adicionalmente, el método puede comprender seguir el grado de combustión del material posterior a la combustión, esto es, después de que la combustión haya cesado.

El seguimiento de la combustión del material, en tiempo real o siguiendo el grado de combustión después de que la combustión haya cesado, puede facilitar la determinación del grado hasta el cual el material ha combustionado y factores que incluyen el tipo de combustión que el material está experimentando o ha experimentado y la velocidad de progresión del frente de combustión a través del material. Por ejemplo, si un frente de combustión está progresando más lentamente de lo que se espera, puede haber una falta relativa de oxígeno presente. Alternativamente, si el frente de combustión está progresando más rápidamente de lo que se espera, puede haber un exceso de oxígeno en relación con el volumen del material.

Por consiguiente, siguiendo la combustión del material, se pueden tomar acciones para lograr una forma y velocidad de combustión óptima o deseada. Por ejemplo, el método puede comprender seguir la combustión del material y suministrar (o modificar la cantidad o relación del suministro) aire/oxígeno en una o más ubicaciones. Alternativamente, el método puede comprender suministrar más combustible, tal como más material combustible, por ejemplo, para ayudar a la ignición del volumen de material. Alternativamente, el método puede comprender suministrar un inhibidor de la combustión tal como nitrógeno o agua, para contener y de este modo controlar la combustión. En una alternativa adicional, el método puede comprender desactivar un dispositivo de ignición (usado para encender el material) y/o reducir o finalizar la adición de oxidante, para controlar (o contener) la combustión. Como se describirá más adelante, esto puede controlar la combustión dependiendo del tipo de combustión que se produzca.

La combustión con llama se refiere a la combustión que se produce en la fase gaseosa. Por ejemplo, cuando una acumulación de NAPL (por ejemplo, queroseno) permanece en un recipiente abierto y se enciende, el calor volatilizará continuamente el combustible, y el combustible gaseoso combustiona produciendo una llama. También se hace referencia a la combustión con llama como combustión homogénea, porque en la ubicación donde se produce la combustión tanto el oxidante (oxígeno en el aire) como el combustible están en la misma fase (gaseosa), donde se mezcla fácilmente. La combustión con llama consume el combustible relativamente rápido, y genera temperaturas relativamente altas (por ejemplo, superiores a 900°C).

La combustión sin llama hace referencia a la combustión de un material sobre la superficie del mismo material sólido/líquido. Por ejemplo, cuando un material combustible (por ejemplo, tabaco) es compactado para formar un sólido poroso (por ejemplo, un cigarrillo) y se enciende, el oxidante (oxígeno) difunde dentro de la superficie del material y la combustión procede sobre la superficie del tabaco. Sin llama se refiere a una combustión heterogénea

porque el oxidante (gas) y el combustible (líquido o sólido) no están en la misma fase. La combustión sin llama procede típicamente de manera lenta con relación a con llama, y genera temperaturas inferiores (por ejemplo, típicamente entre 400°C y 600°C), pero bajo condiciones específicas puede lograr temperaturas por encima de 1000°C. Siguiendo y controlando la combustión, puede promoverse la combustión sin llama.

- 5 En realizaciones particulares, el método puede comprender seguir la combustión para promover o mantener la combustión sin llama del material. Alternativamente, el método puede comprender seguir la combustión para promover la combustión con llama. Estos regímenes diferentes de combustión pueden lograrse siguiendo/controlando el suministro/relación de oxidante (aire/oxígeno/ozono). Por ejemplo, la combustión sin llama, está falta de oxígeno de modo que puede controlarse manejando el suministro de oxígeno, puede propagarse a
10 temperaturas inferiores y necesita menos oxidante. Por consiguiente, siguiendo la combustión y controlando el suministro de oxidante, puede promoverse la combustión sin llama. Si se necesita, puede suministrarse un inhibidor de la combustión como nitrógeno para mantener la combustión en un estado sin llama. También se describe una combustión superadiabática del material, de tal modo que el material experimenta una combustión superadiabática. En la combustión superadiabática, el frente de combustión experimenta un movimiento mínimo con migración del
15 combustible y oxidante hacia la zona de reacción que domina el proceso de combustión.

El método puede comprender controlar el grado de combustión del material, y puede comprender extinguir la combustión después de un periodo de tiempo deseado o determinado; y/o seguir el desplazamiento de un frente de combustión una distancia deseada o determinada a través del material, y de este modo en una ubicación deseada.

- 20 Extinguir la combustión en un tiempo deseado puede lograrse como sigue. Si la combustión todavía no es térmicamente suficiente para ser térmicamente autosostenible, y de este modo un elemento de ignición usado para encender el material está todavía activado, el dispositivo de ignición puede desactivarse para de este modo extinguir la combustión. Si la combustión progresa de un modo térmicamente suficiente, térmicamente autosostenible, y de este modo el elemento de ignición está apagado, pero la combustión está falta/privada de oxígeno de modo que la progresión depende de la adición continua de un oxidante (por ejemplo, aire/oxígeno/ozono), luego el flujo de
25 oxidante puede reducirse o interrumpirse para interrumpir de este modo la combustión. Un modo alternativo de lograr esto será diluir el flujo de oxidante con un inhibidor tal como nitrógeno o agua. Si la combustión progresa en ausencia de suministro de oxidante y sin una necesidad de un dispositivo de ignición que permanezca activado, entonces puede inyectarse un inhibidor de la combustión tal como nitrógeno o agua; esto puede ser de utilidad particular para la descontaminación de tierra contaminada con explosivos químicos que generalmente tienen oxidantes incorporados.
30

- Extinguir la combustión en una ubicación deseada puede lograrse creando una o más barreras de combustión. En realizaciones de la invención, puede formarse un límite o perímetro instalando una o más barreras de combustión. La etapa de formar la una o más barreras puede comprender construir una barrera física. Por ejemplo, puede introducirse un muro rígido de tablestaca (por ejemplo, hecho de acero) dentro del subsuelo para formar un muro
35 aislado. O, por ejemplo, puede inyectarse en el suelo un material que endurece con el tiempo, tal como un material cementoso que contenga bentonita, típicamente en un orificio o zanja excavados, para formar un muro aislado.

- Alternativamente, o además, la etapa de formar la barrera puede comprender formar un muro de contención de fluido, tal como un muro de gas, inyectando fluido en el suelo en una pluralidad de ubicaciones. Por ejemplo, puede taladrarse una pluralidad de orificios/pozos, y/o pueden formarse zanjas (rellenas con grava o similares), e inyectar
40 un fluido de contención a través de los orificios de perforación y/o dentro de la zanja. Estas técnicas pueden proporcionar una barrera que extinga el proceso de combustión en el límite definido de este modo.

Preferiblemente, el material es un fluido no acuoso y por lo tanto relativamente inmisible con el agua, pero puede ser también o alternativamente un sólido. El material combustible puede ser un NAPL, y puede ser en particular un DNAPL o LNAPL.

- 45 También se describe el acceso al volumen de material combustible desde la superficie. Acceder al volumen de material puede comprender taladrar un orificio de perforación, pasaje o similar de acceso desde la superficie hasta una ubicación que interseca el volumen de material o hasta una ubicación adyacente al volumen de material. Esto puede facilitar una ignición posterior del material combustible. El orificio de perforación o similar puede ser sustancialmente vertical, o puede ser un orificio de perforación horizontal. Se entenderá que un orificio de
50 perforación horizontal es uno que incluye al menos una parte que se desvía de la vertical; tales orificios de perforación son conocidos en la industria de explotación y producción de petróleo y gas, y facilitan el acceso al volumen de material desde una ubicación situada lateralmente.

- Taladrar un orificio de perforación horizontal puede facilitar también la ignición posterior del material y la propagación de un frente de combustión a través del material. Esto es porque el orificio de perforación puede ser dirigido a
55 intersecar el volumen en, o adyacente a, un límite inferior o perímetro del volumen. El frente de combustión puede iniciarse por lo tanto en la parte inferior de la región contaminada y propagarse hacia arriba. De este modo, pueden generarse flujos de aire flotante o forzado, ayudando el proceso de combustión. Esto puede promover la conservación de la energía (calor), mejorando la eficacia del método, mientras el calor generado durante la combustión sube o es empujado hacia arriba a través de la tierra mediante un flujo de aire forzado, ayudando el

5 autosostenimiento del proceso de combustión. Esto puede hacer posible quemar muy bajas concentraciones de combustible en presencia de disipadores de calor (tales como zonas de, o que contienen, relativamente grandes volúmenes de agua). Además, la ignición desde abajo puede permitir que el material (NAPL) que sea movilizado por su viscosidad reducida (debido a un aumento de temperatura) fluya lentamente hacia abajo y permanezca dentro de la zona de combustión, y por lo tanto todavía entre en combustión o alternativamente sea recuperado en el orificio de perforación para ignición u otro orificio de perforación dedicado a ese propósito.

10 En una alternativa, el orificio de perforación puede dirigirse a intersecar el volumen de material en, o adyacente a, un límite superior y el frente de combustión propagarse hacia abajo a través del volumen de material. Alternativamente, el orificio de perforación puede dirigirse a intersecar el volumen de material en un límite lateral y el frente de combustión propagarse horizontalmente a través del volumen de material, o localizarse de manera central y la combustión propagarse hacia afuera desde el centro del volumen de material hacia sus extremos.

15 La etapa de encender el material combustible puede comprender colocar un dispositivo de ignición dentro de o adyacente al volumen de material, y puede comprender en particular colocar el dispositivo de ignición extendiéndose a lo largo del orificio de perforación o similar desde la superficie hasta la ubicación que interseca con, o es adyacente a, el volumen de material. Cuando ha de inyectarse en el suelo un fluido de regulación de la combustión (por ejemplo, oxidante o inhibidor), puede proporcionarse un dispositivo de inyección con el dispositivo de ignición, y de este modo colocarse en el orificio de perforación.

20 Los subproductos de combustión que comprenden gases y similares se recogen para análisis y/o desecho. Los subproductos de combustión pueden recogerse en la superficie y albergarse en una cámara de almacenamiento adecuada. Adicionalmente o alternativamente, cuando se logra el acceso al volumen de material a través de un orificio de perforación o similar, los subproductos pueden devolverse a la superficie a lo largo del mismo orificio de perforación u otros orificios de perforación proporcionados expresamente para este propósito. Acceder al volumen de fluido de combustible a través de orificio(s) de perforación o similar(es) puede por lo tanto facilitar adicionalmente la captura de subproductos gaseosos del proceso de combustión. En la presencia de cantidades significativas de agua bajo la superficie, una fracción de productos gaseosos (por ejemplo, dióxido de carbono, que es altamente soluble) pueden disolverse en el agua y de este modo no ser recogidos.

También se describe el seguimiento de subproductos de combustión en la tierra después de la combustión y/o durante la combustión. Esto puede lograrse tomando y analizando muestras de tierra/aguas subterráneas.

30 También se describe en la presente memoria un aparato que no forma parte de la presente invención, siendo dicho aparato para descontaminar tierra contaminada con un material combustible, comprendiendo el aparato un dispositivo de ignición, el dispositivo de ignición adaptado para ubicarse por debajo del nivel del suelo para encender un volumen subterráneo de material combustible en la tierra que ha de descontaminarse, para combustionar el material y de este modo descontaminar la tierra.

35 El dispositivo de ignición puede adaptarse para calentar el material combustible para encender el material, y puede comprender un calentador de resistencia eléctrica. El calentador de resistencia eléctrica puede comprender un elemento eléctrico o alambre que se calienta cuando pasa una corriente eléctrica a través del elemento, y el elemento puede tener un revestimiento o cubierta resistente a la corrosión adaptados para proteger el elemento de materiales corrosivos.

40 Alternativamente, el dispositivo de ignición puede adaptarse para generar una descarga eléctrica o chispa u otra fuente de calor para encender el material de este modo. Si se necesita, el dispositivo de ignición puede comprender un quemador o similar, acoplado a un suministro de combustible, para generar una llama u otra fuente de calor para encender el material. Se entenderá que, con ciertos materiales, la llama u otra fuente de calor puede necesitar solamente mantenerse durante el tiempo que tarde en material combustible en encenderse.

45 El aparato puede comprender al menos un dispositivo de inyección de fluidos para inyectar un fluido (particularmente un gas) adaptado para promover la combustión en el volumen de material, tal como un oxidante que comprende o contiene aire/oxígeno/ozono. Esto puede facilitar el control de la combustión del material para permitir la inyección de oxidante. El dispositivo de inyección de fluidos puede comprender al menos una línea de flujo que se extiende desde la superficie hasta el volumen. Opcionalmente, el dispositivo de inyección de fluidos puede comprender un colector con una pluralidad de salidas, el colector conectado a una línea principal de suministro de fluido, para suministrar el fluido a través de una única línea de suministro a una pluralidad de ubicaciones dentro del volumen. La línea de suministro puede estar contenida dentro del orificio de perforación de ignición al lado del dispositivo de ignición o puede adaptarse para insertarse posteriormente a la retirada del dispositivo de ignición.

55 El dispositivo de inyección de fluido puede estar también para suministrar un inhibidor de la combustión tal como agua o nitrógeno, en el volumen de material, para extinguir selectivamente la combustión, o restringir la combustión de material sin combustionar. El dispositivo de inyección de fluido puede comprender separar líneas de flujo para el flujo de oxidante/inhibidor de combustión o puede adaptarse para el suministro selectivo de cualquiera de los dos.

El aparato puede comprender al menos un sensor para seguir la combustión del material. El aparato puede comprender una pluralidad de sensores repartidos por todo el volumen. El aparato puede comprender un sensor de

temperatura y/o un sensor de gases para determinar el volumen y/o constituyente de subproductos gaseosos que resultan de la combustión del fluido.

La presente invención se describirá ahora, a modo de ejemplo solamente, con referencia a los dibujos adjuntos, en los que:

- 5 la figura 1 es una vista esquemática transversal de una zona de tierra contaminada con un material combustible;
- la figura 2 en una vista de la zona de tierra mostrada en la figura 1 durante la descontaminación, utilizando un método conforme a una realización de la presente invención;
- la figura 3 es una vista esquemática que ilustra la progresión de un frente de combustión a través de un volumen del material combustible mostrado en la figura 1;
- 10 la figura 4 es una vista esquemática aumentada de tierra en el suelo contaminado mostrado en la figura 1;
- la figura 5 es una vista similar a la figura 2 de una zona de tierra contaminada con un material combustible, mostrada durante la descontaminación utilizando un método conforme a una realización alternativa de la presente invención;
- la figura 6 es una vista de la zona de tierra contaminada con un fluido combustible mostrada en la figura 5, mostrada en una variación del método de la figura 5;
- 15 la figura 7 es una vista de la zona de tierra contaminada con un fluido combustible mostrada en la figura 5, mostrada en una variación adicional del método de la figura 5;
- la figura 8 es una vista de la zona de tierra contaminada con un fluido combustible mostrada en la figura 5, mostrada en aún una variación adicional del método de la figura 5;
- 20 la figura 9 presenta una ilustración esquemática de un equipo utilizado en un experimento llevado a cabo para probar la viabilidad del método de la presente invención y el aparato descrito en la presente memoria;
- la figura 10, es una tabla que detalla los resultados de más experimentos llevados a cabo para probar la viabilidad de método de la presente invención y el aparato descrito en la presente memoria, y
- 25 la figura 11 es un gráfico que muestra la temperatura medida frente al tiempo, así como el tanto por ciento (en volumen) de CO y CO₂ en los productos de combustión, medidos durante un experimento de alquitrán de hulla/arena llevado a cabo utilizando el equipo de la figura 9.
- Volviendo en primer lugar a la figura 1, se muestra una zona de tierra 10 que se ha contaminado con un material combustible, en particular, un fluido combustible 12. El fluido combustible comprende típicamente un NAPL y puede comprender en particular un DNAPL que puede ser un disolvente clorado tal como tricloroetileno, tetracloroetileno, o una mezcla compleja de hidrocarburos tales como alquitrán de hulla o creosota. El DNAPL 12 puede haberse desechado previamente vertiéndolo sobre una superficie 14 de la tierra 10, o puede ser el resultado de un vertido accidental. Como se muestra en la figura, el DNAPL ha penetrado hacia abajo a través de la tierra 11 en la zona 10, y ha formado un volumen no uniforme o zona de la fuente 16 de contaminación. Se entenderá que la forma del volumen 16 depende de varios factores que incluyen el volumen de NAPL liberado, las propiedades físicas del fluido del NAPL y la distribución especial de la tierra o permeabilidad de la roca en la región de la tierra 10. El DNAPL 12 ha formado varias "piscinas" de NAPL (es decir, zonas de NAPL estable que está conectado a través de un gran número de poros en la tierra/roca) que incluyen una piscina inferior 18, que se ha acumulado sobre una capa de roca impermeable 20. El DNAPL 12 puede incluir también zonas de NAPL "residual", en las que masas de NAPL desconectadas (poro único) y ganglios (abarcando varios poros) están atrapadas en el espacio poroso, típicamente en un camino a través del cual el NAPL pasa pero no se acumula en una piscina.
- 30 El DNAPL 12 mostrado en la figura 1 ha penetrado hacia abajo a través de la tierra 11 en la zona de suelo 11 hasta un nivel por debajo de la capa freática actual 22. Por consiguiente, durante un periodo de tiempo, los compuestos dentro del DNAPL 12 se disuelven en el volumen 16, se mezclan con las aguas subterráneas, y fluyen en un curso de agua tal como un arroyo, río o similar, creando un problema de contaminación. La presente invención está dirigida a un método para descontaminar o limpiar la zona contaminada de tierra 10 (es decir, la zona de la fuente),
- 35 como se describirá ahora con referencia también a la figura 2.
- 40 Se tendrá en cuenta que el método también se aplica a escenarios con LNAPL, excepto que el LNAPL no penetra sustancialmente en la capa freática, más bien forma una lente que se sitúa por encima de ella (y a menudo la hunde localmente alrededor de la piscina de LNAPL), como se describirá con más detalle más adelante.
- 45 También se entenderá que la fase o fases probables del material presente en el volumen 16 (líquido, gas/vapor y sólido) dependen del material contaminante y de las condiciones ambientales tales como la temperatura y presión ambientes y la presencia de aguas subterráneas. De este modo, bajo otras circunstancias, gas/vapor y/o sólidos pueden también o alternativamente estar presentes en el volumen 16.
- 50

En términos generales, el método comprende descontaminar la zona contaminada de tierra 10 ubicando en primer lugar el volumen subterráneo de DNAPL 12. Esto puede lograrse utilizando una o una combinación de varias técnicas, por ejemplo, usar un equipo geofísico de detección remota (no mostrado), o taladrando y tomando muestras (para tierra, gas o agua) de varios pozos u orificios de ensayo (no mostrados) en varias ubicaciones y profundidades, repartidas alrededor de la superficie 14 en una zona de tierra sospechosa de estar contaminada. Esto facilita la determinación de la forma y volumen general 16 de la zona de tierra 10 contaminada con el NAPL 12. En el ejemplo ilustrado, y como se ha discutido anteriormente, el volumen 12 incluye una piscina inferior 18 que permanece por encima de la capa de roca impermeable 20, sin embargo, tal piscina inferior delimitadora no es un prerrequisito para el método.

Una vez que el volumen 16 se ha ubicado usando tales técnicas, la zona de tierra contaminada 10 se descontamina encendiendo el DNAPL 12, para de este modo combustionar el DNAPL. Esto se logra taladrando un orificio de perforación 26 desde la superficie 14, que se extiende a través de la tierra 11 hasta una ubicación 28 adyacente al límite inferior 24 del volumen de fluido 16. Tales técnicas de taladrado son conocidas, por ejemplo, en la industria de explotación y producción de petróleo y gas. El orificio de perforación 26 es desviado para facilitar el acceso al límite inferior 24, aunque puede taladrarse un orificio de perforación vertical a través del volumen 16 hasta la ubicación 28.

Después de taladrar el orificio de perforación 26 y, si se necesita, forrar con tubos adecuados (tales como longitudes de cubiertas o revestimientos interconectados), se pone un colector de inyección de gas y un dispositivo de ignición de material 30 dentro del orificio de perforación 26 desde la superficie 14 hacia abajo hasta la ubicación 28. El dispositivo 30 se conecta al equipo de control y a una fuente de aire/oxígeno/ozono comprimido (no mostrada) en la superficie 14, por medio de un umbilical 32. El dispositivo 30 comprende también un colector 31 con una pluralidad de salidas de gas 33.

El dispositivo de ignición 30 incluye un cable o alambre calentador recubierto (no mostrado) que, cuando se activa, se calienta rápidamente para calentar a la vez el DNAPL 12 que ha entrado dentro de la cortina del orificio de perforación 26 y en la zona que rodea el dispositivo 30. Un material adecuado para la cubierta del cable calentador es INCONEL®, aunque pueden utilizarse otros materiales. Esto provoca que el DNAPL 12 se encienda, comenzando de este modo la combustión del DNAPL. La cubierta protege el calentador de la exposición a compuestos corrosivos presentes en el suelo, particularmente del propio DNAPL 12. En una disposición alternativa, cuando se desea combustionar el DNAPL 12 en el volumen 16, se genera una descarga eléctrica o chispa (o de hecho cualquier otro medio de producir calor) mediante el dispositivo 30, proporcionando una señal de control adecuada desde la superficie, encendiendo de este modo el DNAPL 12. Una vez que se ha encendido el DNAPL 12, se genera un frente de combustión 34, como se muestra en la vista esquemática de la figura 3, que se desplaza a través del volumen 16 desde la ubicación 28, extendiéndose el frente de combustión hacia afuera desde el dispositivo 30.

Puede inyectarse un oxidante bajo la superficie a través del colector del orificio de ignición 31. La naturaleza porosa de la tierra 11 en la zona de suelo 10 y la inyección de oxidante en la misma ubicación que la ignición asegura la propagación hacia adelante (en la dirección del flujo) del frente de combustión, por lo que la energía se recupera de una región caliente quemada 16a del volumen de DNAPL, y se transfiere a una región sin quemar 16b. Es probable que la combustión proceda sin llama, produciéndose la combustión sobre la superficie del material y el oxidante difundiendo dentro de esa superficie. Después de la ignición, el frente de combustión 34 se desplaza a través del volumen 16 para combustionar las piscinas restantes de DNAPL 12 que están en comunicación fluida con la piscina 18, como se indica mediante las flechas en la figura 2. Las zonas de DNAPL residual combustionan también debido a la capacidad de los medios porosos para retener y transmitir temperaturas que apoyen la combustión, incluso cuando el NAPL no está en una continua conexión fluida en todo el espacio poroso. Los subproductos gaseosos del proceso de combustión pasan hacia arriba a través de la tierra hacia la superficie 14, y puede permitirse que pasen hacia la atmósfera, o pueden recogerse para un tratamiento adicional y/o almacenamiento usando un equipo adecuado de recogida y almacenamiento (no mostrado). Los subproductos gaseosos pueden extraerse también a través del orificio de perforación 26 (u otros orificios de perforación instalados con tal fin) y recogerse de una manera similar. Es posible que una fracción de los productos de combustión condense hasta la fase líquida cuando entre en contacto con tierra o agua fría por encima del frente de combustión. Generalmente, se espera que los productos de combustión sean principalmente agua, CO y CO₂.

El método facilita por tanto la descontaminación del área contaminada de tierra 10 mediante la combustión de los DNAPL 12 en el volumen 16.

El método de la invención y el aparato descrito en la presente memoria se describirán ahora con más detalle, con referencia también a la figura 4, que es una ilustración esquemática aumentada de la tierra 11 en el volumen contaminado 16.

El DNAPL penetra en la tierra 11 en el suelo 10 desde la superficie 14, y reside dentro de los espacios de poros interconectados 36 entre partículas de tierra 38, como se muestra en la figura 4. Sin embargo, se entenderá que los NAPL pueden estar también contenidos dentro de fracturas o fisuras abiertas en un entorno de roca/arcilla fracturada y/o en la matriz porosa consolidada dentro de la cual las fracturas están incorporadas. La combustión de los combustibles hidrocarbonados tales como DNAPL 12 dentro de una matriz porosa como la tierra 11, genera una

- reacción exotérmica autosostenible dentro de los espacios porosos 36, durante la cual se trasmite el calor desde el DNAPL 12a ardiente (figura 3) hasta tanto los espacios porosos 36 como la matriz sólida (las partículas de tierra 38). La presencia de los medios porosos tiene un impacto beneficioso significativo sobre el proceso de combustión por cuanto las partículas sólidas 38 tienen una alta inercia térmica, calentándose de este modo y almacenando energía de la reacción de combustión. La transmisión de este calor a través de los medios porosos y por medio del oxidante calentado (gas) que se desplaza en la misma dirección que el frente de combustión, puede crear una región precalentada delante del frente. De este modo, mucha de la energía liberada puede devolverse a la reacción cuando ésta alcanza la ubicación precalentada. Las pérdidas de calor son por lo tanto pequeñas, permitiendo la propagación de un frente de combustión incluso para concentraciones muy bajas de combustible y/o oxidante.
- Este mecanismo de retroalimentación de energía puede dar como resultado de este modo temperaturas en la zona de reacción 34 que superan significativamente las típicamente posibles para un DNAPL dado 12. Los productos de combustión liberarán la mayor parte de su energía hacia los DNAPL sin combustión 12b cercanos al frente de combustión (es decir, la reacción) 34, dejando por consiguiente frías las inmediaciones del frente de combustión. De este modo, es posible un proceso de combustión de autopropagación eficiente, en condiciones que de otra manera conducirían a la extinción del proceso de combustión.
- La velocidad de propagación de la reacción exotérmica a través de la tierra puede estar también influenciada significativamente por la dirección del flujo oxidante, que está en la dirección del flujo del aire que lleva oxígeno. Por consiguiente, el método puede implicar el suministro de aire (o alternativamente mezclas de oxígeno, nitrógeno y otros gases, por ejemplo, ozono) a la tierra en la zona 10, durante el proceso de combustión. De hecho, la velocidad de propagación de una reacción exotérmica a través de la matriz porosa de la tierra 11 está influenciada significativamente por la dirección del flujo de aire (oxidante). La figura 3 demuestra cómo la propagación hacia adelante usa el oxidante inyectado (aire/oxígeno) para recuperar energía y ayudar de este modo la propagación de la reacción. Cuando se tratan combustibles (NAPL) de bajo rendimiento calorífico, una concentración de combustible muy baja o en presencia de disipadores térmicos tales como agua, es necesario asegurar que la mayor parte de la energía generada por la reacción exotérmica se recupere por el combustible sin quemar y el oxidante. De este modo, la propagación será generalmente hacia adelante, como se ilustra en la figura 3. Dentro del modo hacia adelante, pueden identificarse tres regímenes basados en el caudal de oxidante: exceso de calor que provoca la aceleración del frente de reacción, falta de calor que provoca deceleración, y acumulación de calor exactamente en el frente de reacción 34. Esta tercera condición ideal se conoce como combustión superadiabática. El régimen específico logrado en cualquier aplicación puede manipularse por lo tanto dependiendo del resultado deseado, controlando la inyección de aire/oxígeno a través del dispositivo de inyección 30, y/o el suministro de un inhibidor tal como nitrógeno o agua, como se describirá más adelante. La velocidad de propagación también está afectada por el diámetro de poros 36 de la tierra 11 y la fracción de porosidad ocupada por el combustible, aire y otros materiales sin reaccionar.
- La propagación de un frente de reacción hacia adelante dentro de una matriz porosa tal como la tierra 11 puede subsistir dentro de un amplio intervalo de condiciones. Las variables más importantes son la naturaleza del medio poroso, las propiedades térmicas del material combustible y el suministro de oxígeno. Para grandes caudales de aire (gran suministro de oxígeno), hay una gran liberación de energía y la propagación del frente de aceleración se acelerará. Si se reduce el suministro de oxígeno, la energía producida disminuye y el frente de reacción decelerará, una reducción adicional del suministro de oxígeno puede conducir a la extinción. Bajo estas condiciones, las reacciones exotérmicas resultan principalmente de la oxidación de la superficie de los combustibles líquidos; este modo de combustión se denomina sin llama (por ejemplo, un cigarrillo). La combustión sin llama procede típicamente de manera lenta con relación a las llamas y genera temperaturas más bajas (típicamente entre 400°C y 600°C), pero en condiciones específicas puede lograr temperaturas por encima de 1000°C. Además, la combustión sin llama es posible con relaciones entre aire y combustible extremadamente bajas, e incluso en ausencia de cualquier suministro de oxígeno externo. De este modo, es posible un intervalo de regímenes de funcionamiento: la combustión sin llamas de NAPL lenta es probable en ausencia de porosidad rellena de aire, mientras que una inyección periódica o continua de aire (oxígeno) (a través del dispositivo 30) aumentará las temperaturas y acelerará la propagación del frente de quemado (es decir, descontaminación) a través de la zona de fuente.
- De este modo, para lograr una combustión óptima y de este modo el progreso del frente de combustión 34 a través del volumen 16 del DNAPL 12, la combustión de los DNAPL puede seguirse. Esto puede lograrse siguiendo la temperatura de la tierra en, y alrededor de, el volumen 16 en varias ubicaciones repartidas por todo el volumen y tierra circundante, usando sensores de temperatura adecuados (por ejemplo, termopares; tres mostrados en la figura 2 y con los números de referencia 40, 42 y 44). Estos sensores 40, 42 y 44 están ubicados en pequeños orificios de perforación o pasajes 46, 48 y 50 taladrados desde la superficie 14 en la tierra en el volumen 16 y la zona circundante. Igualmente, los constituyentes y/o volumen de los subproductos gaseosos que resultan del proceso de combustión pueden seguirse o en la superficie 14 o tomando muestras en diversas ubicaciones por todo el volumen 16, de un modo similar que para obtener los datos de temperatura. Estos subproductos gaseosos pueden también o alternativamente extraerse a través del orificio de perforación 26. Siguiendo la temperatura y constituyentes/volumen de los subproductos gaseosos, puede determinarse la naturaleza de la combustión que se produce en tiempo real, permitiendo la modificación de la acción que ha de tomarse, si se necesita. Por ejemplo, variando el suministro de oxígeno con un efecto consecuente en la propagación del frente de combustión 34. En las circunstancias en las que se suministra aire u oxígeno durante el proceso de combustión, esto puede ser en

continuo o en intervalos periódicos, como se necesite. También, el oxidante puede suministrarse en una sola ubicación o en múltiples ubicaciones para facilitar el progreso del frente de combustión por toda la zona de la fuente, como se describirá más adelante.

5 Volviendo ahora a la figura 5, se muestra una vista similar a la figura 2 de una zona de tierra contaminada con un LNAPL tal como gasolina, combustible para reactores, fuel para calefacción o gasóleo. En la figura, la zona de tierra es designada como 100 y el LNAPL tiene el número de referencia 112. El LNAPL se diferencia del DNAPL 12 ilustrado en la figura 1 en que es más ligero que el agua y de este modo tiende a acumularse en espacios porosos o grietas en formaciones de roca/arcilla o sobre o por encima de la capa de aguas subterráneas existente (la capa de aguas subterráneas es esencialmente la superficie superior de la zona saturada de agua, por encima de la cual el aire llena parcialmente el espacio poroso).

El método empleado para descontaminar la zona de tierra 100 para retirar el LNAPL 112 es esencialmente similar al descrito anteriormente con relación a las figuras 1 a 4, y solamente las diferencias sustanciales se describirán en la presente memoria. Como los componentes del aparato utilizado para limpiar la tierra 100 con el aparato usado para limpiar la tierra 10 mostrados en las figuras 1 a 4 se dan los mismos números de referencia, aumentados en 100.

15 En la realización ilustrada, se ha taladrado un orificio de perforación vertical 126 desde la superficie 114 hasta una ubicación 128 adyacente a un límite inferior o perímetro de un volumen de fluido 116 de LNAPL 112. Se inserta un dispositivo de ignición 130 y luego se activa para combustionar el LNAPL 112 en el volumen de fluido 116. La combustión del LNAPL 112 se sigue, y los subproductos se recogen óptimamente del mismo modo que el descrito anteriormente.

20 Volviendo ahora a la figura 6, se muestra una vista de la zona de tierra 100 contaminada con LNAPL 112 mostrada en la figura 5. En la figura 6, sin embargo, se desea limitar el recorrido del frente de combustión a través del volumen 116 de LNAPL desde el punto de ignición, para que el frente de combustión no pase a la tierra presente en una zona 52. Esto se logra taladrando un orificio de perforación 54 desde la superficie, insertando un dispositivo que contiene la combustión 56, e inyectando un fluido que inhibe la combustión 58 (tal como agua o nitrógeno) en la tierra contaminada, como se indica mediante las flechas de la figura. El fluido inyectado forma una barrera 60 que limita el paso del frente de combustión al LNAPL 112 sin combustionar en la zona 52.

30 Volviendo ahora a la figura 7, se muestra de nuevo una vista de la zona de tierra 100 contaminada con LNAPL 112 mostrada en la figura 5. Una vez más, se desea limitar el recorrido del frente de combustión a través del volumen 116 de LNAPL desde el punto de ignición, para que el frente de combustión no pase a la tierra presente en una zona 52. En la realización ilustrada, esto se logra construyendo una barrera física para contener la combustión 62. La barrera 62 se forma típicamente excavando una zanja 63 y vertiendo un material cementoso basado en bentonita que endurece con el tiempo 64 en la zanja. Una vez que el material 64 ha endurecido, se crea una barrera sólida 62 que impide el recorrido del frente de combustión hasta el área 52. Pueden emplearse métodos alternativos para formar la barrera 62. Por ejemplo, pueden introducirse mediante percusión láminas metálicas (no mostrado) dentro del suelo.

40 La figura 8 ilustra en una vista esquemática en planta la zona de tierra 100 mostrada en la figura 5. En este caso, se desea restringir el paso del frente de combustión a la zona 52 y también a la zona 66 del suelo. Los métodos ilustrados y descritos con relación a las figuras 6 y 7 se emplean en combinación en el método de la figura 8, con la técnica más apropiada seleccionada basándose en factores que incluyen las propiedades particulares de la tierra en la zona contaminada 100.

Por ejemplo, la tierra en la zona 52 puede consistir en su mayor parte en formaciones rocosas inadecuadas para el método de excavación/acumulación descrito con relación a la figura 7. Por consiguiente, el método de la figura 6 puede seguirse, con varios orificios de perforación 54a, 54b y 54c taladrados usando una barrena de perforación.

45 Se instalan dispositivos de contención de la combustión en forma de líneas de suministro de gas 56a, 56b y 56c (respectivamente) en cada orificio de perforación 54 y el fluido de contención se inyecta a través de cada orificio de perforación 54 para formar la barrera 60. Por contraste, la tierra en la zona 66 puede consistir en su mayor parte en tierra blanda o formaciones basadas en arcilla, y puede seguirse luego el método de excavación/acumulación de la figura 7 para formar la barrera 62.

50 Se entenderá que pueden taladrarse varios orificios de perforación 54, repartirse alrededor del volumen 116, para permitir la inyección de fluido inhibidor de la combustión durante el proceso de combustión, si se necesita. Por ejemplo, pueden inyectarse agua o nitrógeno durante el proceso de combustión para mantener la combustión sin llama o para contener la reacción en el caso de que se encuentre que la combustión exceda la velocidad más allá de la velocidad de propagación deseada. Esto puede producirse cuando el frente de combustión se acerque a la superficie. Puede determinarse un requisito para inyectar un inhibidor de la combustión de esta manera mediante el seguimiento de la temperatura de combustión y la temperatura, presión y/o contenido de los subproductos de combustión, como se ha descrito anteriormente.

También se ilustran en la figura 8 múltiples dispositivos de ignición 30a, 30b, que están repartidos a través del ancho del volumen 116. Los dispositivos 30a y 30b son activados típicamente de manera simultánea para comenzar la

combustión del LNAPL 112 en el volumen 116. Además, se muestran varios orificios de perforación 68a a d para suministro de oxidante, a través de los cuales puede inyectarse un oxidante tal como aire u oxígeno (como se indica mediante las flechas 70 a a d). Se entenderá que puede inyectarse oxidante durante el proceso de combustión para promover, mantener y/o acelerar la combustión. Por ejemplo, en el caso de que haya insuficiente oxígeno presente incluso para que se produzca la combustión sin llama, y la combustión esté en peligro de extinción, puede ser necesario inyectar un oxidante. Puede determinarse, de nuevo, un requisito para inyectar oxidante de esta manera a través del seguimiento de la temperatura de combustión y la temperatura, presión y/o contenido de los subproductos de combustión, como se ha descrito anteriormente.

Se entenderá que la combustión del LNAPL 112 puede progresar desde un único punto de ignición dentro del volumen 116, usando uno de los dispositivos 30a,b. Sin embargo, si durante la progresión del frente de combustión a través del volumen 116, el seguimiento del proceso de combustión indica un requisito para encender el LNAPL 112 en una ubicación adicional, el otro de los dispositivos 30a,b, o incluso un dispositivo adicional (no mostrado) puede activarse.

Se entenderá que la combustión del NAPL 112 puede ser térmicamente autosuficiente por cuanto el, o cada dispositivo de ignición, 30a,b, puede apagarse; y puede haber oxígeno suficiente de modo que no se necesite oxidante que sea suministrado a través de los dispositivos de contención 56. De este modo, la combustión puede automantenerse por cuanto puede ser térmicamente autosuficiente, y/o autosostenible por cuanto puede haber suficiente oxígeno y de este modo no es deficiente en oxígeno. El seguimiento de la combustión como se ha descrito anteriormente permite que se tome una acción apropiada (tal como apagar los dispositivos de ignición o cortar el flujo de oxidante) una vez que la combustión es autosuficiente. En el caso de que se determine que la combustión no es térmicamente suficiente, puede mantenerse uno o más de los dispositivos de ignición 30a,b en un estado activado.

En términos generales, en cada una de las realizaciones descritas anteriormente, se desea promover/mantener la combustión sin llama, y puede tomarse una acción descontaminante apropiada para promover o mantener tal combustión.

Sigue una descripción de experimentos preliminares llevados a cabo para verificar la validez de los métodos y aparatos de la invención descritos anteriormente.

Equipos y métodos para los experimentos preliminares:

Equipos:

Celda experimental: vaso de precipitados de vidrio de cuarzo (2 tamaños, H. Baumbach & Co., Ltd., Ipswich, RU)

- 1) DE = 103 mm, H = 175 mm (opaco)
- 2) DE = 106 mm, H = 195 mm (transparente)

Difusor de aire: tubo de cobre enrollado en espiral de 8 mm perforado con orificios de 2 mm

Encendedor: calentador de cable revestido con Inconel® de 450 W, sección transversal de 3,25 mm cuadrados x 762 mm de longitud (sección transversal de 0,128" cuadradas x 30" de longitud) (Watlow Ltd, Linby, RU, parte nº 125PS30A48A)

Análisis de gas: unidades de analizador de CO y CO₂ (ADC Gas Analysis Ltd, Hoddesdon, RU)

Termopares: termopares de tipo K cubiertos con Inconel® de 1,5 mm y 3 mm x 0,5 mm (RS Components Ltd., Corby, RU, nº 219-4488 (3 mm) y nº 159-095 (1,5 mm))

Adquisición y registro de datos: interruptor multifunción/unidad de medida (Agilent Technologies, Santa Clara, CA, EE.UU., nº 34980A)

Manta aislante: cinta de calentamiento de 240 V, 1045 W, 2,54 cm x 254 cm, 1,33 W/cm² (Omega Engineering Ltd., Manchester, RU)

Tipos de medios porosos (tierra):

- a) Arena gruesa de cuarzo (arena de Leighton Buzzard de 8/16, WBB Minerals, Sandbach, RU)
- b) Arena fina de cuarzo (arena de sílice Lochaline L60A, Tarmac Central Ltd., Buxton, RU)
- c) Turba (muestra de campo)
- d) Arenas petrolíferas (muestra de campo, arena fina revestida de forma natural con petróleo solidificado)

Oxidante inyectado:

Aire ambiente, caudal desde cero l/min hasta aproximadamente 20 l/min

Contaminantes:

- a) Alquitrán de hulla recién fabricado (Alfa Aesar, Heysham,
- b) RU, artículo nº 42488; un DNAPL multicomponente viscoso)
- 5 c) Aceite vegetal (Sainsbury's Supermarkets Ltd, Londres,
- d) RU; un LNAPL viscoso representativo no tóxico)
- c) Dodecano (Fisher Scientific UK Ltd, Loughborough, RU, artículo nº 36577-0010; un LNAPL de baja viscosidad)
- d) Tricloroetileno (TCE) (Fisher Scientific UK Ltd, Loughborough, RU, artículo nº 15831-0010; un disolvente clorado DNAPL)
- 10 e) 1,2-dicloroetano (DCA) (Fisher Scientific UK Ltd, Loughborough, RU, artículo nº D/1756/15; un etano clorado DNAPL)
- f) Grasa (grasa MPG50T multiusos Electrolube; un LNAPL multicomponente viscoso)
- g) Muestra de campo de alquitrán de hulla (recuperada recientemente de un lugar del RU sobre el cual una planta de fabricación de gas funcionó al principio de los 1900; DNAPL)
- 15 h) Compuesto explosivo sólido (nitrato amónico en partículas – el principal componente del TNT o DNT – mezclado con componentes inertes; compuesto sólido que incorpora oxidante)
- i) Petróleo (revestimiento solidificado que se produce en la naturaleza sobre arenas petrolíferas, obtenido como parte del núcleo de la muestra de campo).

20 Nota: en el campo, no se encuentran típicamente disolventes clorados como compuestos químicos puros (es decir, de calidad de laboratorio), sino mezclados con hasta 30% de petróleo y grasa (Dwarakanath, V., R. E. Jackson y G. A. Pope, 2002. Influence of Wettability on the Recovery of NAPLs from Alluvium. Environmental Science and Technology, 36 (2), 227-231). De este modo, los experimentos con disolventes emplearon mezclas multicomponente (véanse los resultados): 75% de TCE + 25% de petróleo (en peso), 75% de dodecano + 25% de petróleo (en peso), 25 75% de DCA + 25% de grasa (en peso).

Procedimiento experimental:

La figura 9 presenta una ilustración esquemática del experimento. Los experimentos preliminares para examinar los conceptos básicos de la combustión in situ para la descontaminación de medios porosos contaminados se llevó a cabo en un vaso de precipitados de vidrio de cuarzo de aproximadamente 1 l (103 mm de DE x 175 mm de altura o 30 106 mm de DE x 195 mm de altura, H. Baumbach & Co., Ltd.). El vaso de precipitados se llenó con una pequeña cantidad de arena gruesa (arena de Leighton Buzzard de 8/16, WBB Minerals) suficiente para colocar el difusor de aire 74 por encima de la parte inferior del vaso de precipitados varios milímetros. El difusor de aire 74 consistió en una longitud de tubo de cobre de 8 mm, enrollado en una espiral y perforado con orificios de 1,5-2 mm a lo largo de la parte inferior del tubo para que el flujo de aire se dirija directamente hacia arriba. Los medios porosos elegidos se usaron para enterrar el difusor de aire varios milímetros. El elemento de ignición 76, un calentador de cable enrollado revestido con Inconel® de sección transversal de 3,25 mm cuadrados x 762 mm de longitud, (240 V, 450 W, parte nº 125PS30A48A, Watlow Ltd), se colocó por encima del difusor de aire 74. Los medios porosos elegidos 35 75 se añadieron luego al vaso de precipitados para enterrar el elemento de ignición 5 centímetros. Si el contaminante fue un sólido, se mezcló con la arena que se colocó en esta etapa. Si el contaminante fue líquido, entonces se añadió posteriormente y se dejó que se filtrara hacia abajo a través de los medios, sumergiendo típicamente el calentador de cable 76. De este modo, la zona del contaminante estuvo típicamente 5 cm de altura por encima del elemento de ignición 76. Se llenó luego con los medios porosos elegidos hasta 5 cm de la parte superior del aparato. Se colocaron tres centímetros de arena fina (arena de sílice Lochaline L60A, Tarmac Central Ltd.) en la parte superior de los medios porosos emplazados para servir como tapa. Se insertaron en los medios 40 45 porosos hasta cinco termopares de tipo K cubiertos con Inconel® de 1,5 mm o 3 mm x 0,5 mm 78 a a e (partes nº 219-4488 (3 mm) y nº 159-095 (1,5 mm), RS Components Ltd.), con sus puntas de medición expuestas en ubicaciones de intervalos de 1 cm por encima del calentador de cable 76, con el último termopar 78e colocado típicamente fuera de la zona contaminada. Los termopares 78 a a e se conectaron a un interruptor multifunción/unidad de medida (34980A, Agilent Technologies) que recogió los datos, convirtió la salida de tensión en temperatura, y pasó los resultados a un ordenador.

El pequeño diámetro del aparato usado en estos experimentos preliminares significa que el sistema tiende a tener una pérdida excesiva de calor (lo cual no se espera en experimentos más grandes o en aplicaciones in situ). Para reducir las pérdidas de calor, el vaso de precipitados de vidrio 72 se envolvió en cinta de calentamiento (240 V, 1045

W, 1,33 W/cm² (Omega Engineering Ltd.). La cinta de calentamiento se utilizó encendiéndola en primer lugar, llevando al sistema a una temperatura inicial elevada (pero insuficiente para la combustión, es decir, aproximadamente 200°C) para neutralizar la pérdida de calor al aire circundante. Una vez que se logró la temperatura, el elemento de ignición calentador de cable 76 se activó con una corriente de 1,7 amperios. Poco después, se inició el flujo de aire, suministrado a un caudal de 20 l/min. Una vez que comenzó el flujo de aire, se dejó que permaneciera encendido el elemento de ignición 76 hasta después de que la lectura de temperatura del termopar 78a más cercano al elemento de ignición 76 llegó a un pico y empezó a disminuir. Se realizaron medidas de CO y CO₂ (ADC Gas Analysis Ltd.) de la corriente de gas que salía de la parte superior de los medios porosos 75, ya que estos son subproductos de combustión. Después de apagar el elemento de ignición, continuó la inyección de aire, como continuó el registro de temperatura, CO y CO₂ hasta que cantidades insignificantes de CO o CO₂ estuvieron presentes en los gases de salida y la temperatura de reacción descendió hasta niveles en los que no era probable que mantuvieran una reacción de combustión. Después de que el sistema se hubo enfriado, los medios porosos 75 se excavaron con cuidado. Se tomaron fotografías para demarcar el alcance de la descontaminación, y el grado de contaminación restante se evaluó visualmente. En algunos casos, se analizaron muestras para determinar contaminantes residuales mediante cromatografía de gases, con el método siguiente.

Se usó un espectrómetro de masas con cromatografía de gases (CG/EM) para los experimentos de tricloroetileno (TCE) y 1,2-dicloroetano (DCA). Se colocaron aproximadamente 10 gramos de cada tierra en un vial de 20 ml con espacio libre y se sellaron con engaste con un septum de PTFE/silicona. Se optimizó el método de CG/EM para identificar bajas cantidades de DCA y tricloroetileno, TCE. El límite de detección para TCE y DCA es aproximadamente de 0,5 ppm.

Se empleó un detector de ionización de llama con cromatografía de gases (CG/FID) para los experimentos que implicaban dodecano, aceite vegetal y alquitrán de hulla. Se colocaron aproximadamente 10 g de cada arena en un vial de vidrio de 20 ml. Se añadió diclorometano hasta un nivel de aproximadamente 1 cm por encima de la arena. Los viales se sellaron con engaste con septa de PTFE/silicona, se agitaron y se colocaron en una incubadora a 50°C durante 12 horas. Los viales luego se agitaron, se dejó asentarse la arena y se retiró el extracto, y se transfirió a viales para inyector automático para análisis. Se registraron las masas antes y después de la incubación para asegurar pérdidas limitadas durante el calentamiento. El límite de detección para los compuestos mediante este método es aproximadamente de 0,5 ppm.

Resultados:

Se han llevado a cabo por encima de 30 experimentos, examinando diferentes fuentes de ignición, ajustes experimentales, dispositivos de equipos, tipos de combustible, tipos de arena, etc. Varios de estos no se presentan aunque ayudaron a refinar la ignición final y los procedimientos experimentales (esbozados en el procedimiento experimental anterior). Esta sección describe con detalle un experimento, el de la combustión del alquitrán de hulla en arena gruesa de cuarzo, como una serie representativa de resultados experimentales que siguieron el método experimental descrito. Los resultados de otros experimentos usando el procedimiento descrito se resumen en forma de tabla en la figura 10.

Experimento con alquitrán de hulla dentro de arena gruesa:

La figura 11 presenta los resultados para el contaminante líquido alquitrán de hulla dentro de arena gruesa de cuarzo, siendo las líneas del gráfico 80a a e representativas de la temperatura medida frente al tiempo para los termopares correspondientes 78a a e. La figura 11 ilustra también el tanto por ciento (en volumen) de CO y CO₂ en los productos de combustión.

La subida de temperatura inicial está asociada a la cinta de calentamiento. En experimentos llevados a cabo sin la cinta, se observa una subida de temperatura similar, como resultado del elemento de ignición, pero el calor está menos igualmente distribuido, controlada en su lugar por el termopar más bajo 78a, que está cerca del dispositivo de ignición. La escala del aparato de ensayo da como resultado un aumento de la pérdida de calor, que necesita compensarse mediante una cinta de calentamiento de baja temperatura (es decir, aproximadamente 200°C). Ha de notarse que la cinta de calentamiento se necesita solamente debido al pequeño tamaño de este aparato experimental "prueba de concepto"; en un aparato experimental a escala completa, como en el campo, el volumen de los medios porosos es lo suficientemente grande para actuar como aislante, y por lo tanto las pérdidas de calor de este tipo no se producirán, y tal aplicación adicional de calor no se necesitará. Esto es coherente con un análisis teórico que amplía a escala los resultados a sistemas más grandes y con una amplia experiencia experimental en la combustión sin llama de espuma porosa sólida (por ejemplo, cojines) en una variedad de escalas.

La figura 11 demuestra que cuando el elemento de ignición 76 se enciende, la temperatura aumenta rápidamente en las inmediaciones. El aumento de temperatura se acelera de nuevo cuando el flujo de aire (oxidante) comienza. La figura 11 demuestra que la combustión in situ se inicia relativamente rápido después de este tiempo, como demuestra la aparición de CO y CO₂, que son productos de combustión gaseosos. Su aparición coincide con la temperatura de ignición y el tiempo de ignición, observados como 400°C y 57 min en este experimento, respectivamente. Las temperaturas in situ aumentan rápidamente de manera típica después del comienzo de la

combustión, con la máxima temperatura tomada como el pico máximo logrado en cualquier termopar 78 (en este caso, el segundo termopar 78b desde el elemento de ignición 76).

5 En este experimento, se apagó el elemento de ignición 10 minutos después del comienzo de la combustión, manteniendo el suministro de oxidante. Después de este tiempo, la figura 11 ilustra que se observa una combustión
 10 autosostenible en este experimento, que significa que el frente de combustión se propaga a través de la zona contaminada sin la adición de energía externa. Las pruebas para esto incluyen la sucesión de picos de temperatura en ubicaciones sucesivas más lejos del punto de ignición (por ejemplo, la temperatura máxima mantenida entre los termopares 78a y 78b (TC1 y TC2) y la temperatura máxima mantenida entre los termopares 78c y 78d (TC3 y TC4),
 15 como se indica mediante las líneas del gráfico 80a a d. Una prueba adicional es el "cruce" sucesivo de gráficos de perfil de temperaturas (por ejemplo, la temperatura en TC4 está todavía aumentando mientras que en TC3 está disminuyendo; nótese que TC5 no está dentro de la zona del contaminante). El calor se transfiere desde alta temperatura hasta baja temperatura, de este modo un cruce indica que el calor se está transfiriendo desde el termopar 78d (TC4) hasta el termopar 78c (TC3), demostrando que se produce una generación significativa de calor en la ubicación del termopar 78d (TC4). La producción continua de gases de combustión (CO y CO₂) proporciona
 20 una prueba adicional de que la combustión continúa después de apagar el elemento 76. La velocidad del frente de combustión que se propaga se mide dividiendo la distancia espacial entre los termopares 78 entre el tiempo entre picos de temperatura máxima; en este caso la velocidad se estima de $4,1 \times 10^{-5}$ m/s. Los valores de la bibliografía con diferentes combustibles indican que éstos son velocidades típicas de propagación de la combustión sin llama. El descenso final de la temperatura en cada ubicación sigue un perfil similar, representativo de la disipación de la energía después de haber destruido todo el contaminante, y de que la reacción se ha autoextinguído localmente.

A modo de comparación, el experimento del caso base se repitió exactamente pero sin combustible/contaminante en los medios porosos. El perfil de temperatura 80f del termopar 78d (TC4 – arena solamente) es directamente comparable al TC4 del experimento del alquitrán de hulla. La superficie bajo la historia de la temperatura es proporcional a la energía liberada durante el proceso, por lo tanto la diferencia entre los dos representa la energía
 25 producida por la combustión del contaminante. La estimación de las superficies bajo cada curva demuestra que la energía producida por el proceso de combustión en las inmediaciones del termopar 4 es más de cuatro veces superior a la energía desprendida por el sistema de ignición en esta ubicación. Esto proporciona una clara prueba de que una vez que se ha logrado la ignición, la energía que se necesita para la propagación autosostenida puede desprenderse mediante la combustión del contaminante sin más necesidad de posteriores dispositivos de ignición.
 30 Todo el exceso de energía se desprenderá hacia adelante, y de este modo se usará para acelerar el frente de reacción.

Se tomaron fotografías del contaminante y del material poroso antes y después del experimento, lo que reveló la exhaustividad de descontaminación en la zona de combustión: no quedó nada observable de contaminante. La manipulación física de la tierra descontaminada y la comparación de las mediciones de densidad aparente antes y
 35 después también confirmó que no quedaba contaminación. Las fotos también mostraron que el alquitrán de hulla localizado debajo de dispositivo de ignición 76 (y de este modo fuera de la zona de combustión) no queda descontaminado a pesar de estar calentado sustancialmente; en lugar de ello el alquitrán de hulla y la arena se solidifican parcialmente tras el enfriamiento. También se observó que la descontaminación mediante combustión in situ cambia el color de la tierra a rojo, que es el resultado de la oxidación del hierro a alta temperatura y se observa típicamente en la tierra afectada por los fuegos forestales, donde la temperatura sobrepasa los 600°C.
 40

El análisis de cromatografía de gases (CG) se utilizó para evaluar en qué grado los compuestos permanecieron en la tierra excavada de la zona de combustión. Como se indica en la columna final de la figura 10, solamente se detectaron muy pequeñas cantidades de compuestos residuales, con una señal cercana al límite de detección del método e insuficiente para su cuantificación.

45 La figura 10 presenta un resumen de resultados de otros 13 experimentos llevados a cabo con el mismo método descrito para el experimento presentado de alquitrán de hulla/arena gruesa. La figura 10 ilustra que la combustión in situ se logró exitosamente en todos los experimentos. Esto incluye 3 NAPL comunes adicionales y dos materiales sólidos. La figura indica también una combustión sin llama in situ exitosa para una variedad de tipos de medios porosos, para una variedad de saturaciones de fluidos (tanto agua como NAPL), para muestras derivadas del campo
 50 así como muestras de laboratorio, y condiciones heterogéneas en la zona de la fuente (es decir, zona de combustión). En sólo dos experimentos se observó algún contaminante que quedaba en la zona de combustión; en estos casos la canalización del oxidante provocó claramente que el oxidante bordeara una ubicación en la que no se logró la combustión. El análisis por CG confirmó la eliminación virtual de todos los compuestos orgánicos de la zona de combustión en los 8 experimentos sometidos a análisis. Las velocidades de propagación de la combustión en la figura 10 son típicas de la combustión sin llama, siendo el régimen de combustión dominante en estos experimentos.
 55

Se llevaron a cabo dos casos base repetidos (es decir, alquitrán de hulla en arena gruesa) y se obtuvieron resultados muy similares a los descritos en la figura 10, indicando la reproducibilidad del método. Se llevó a cabo una tercera repetición, pero en este caso se puso fin al flujo de aire aproximadamente 5 minutos después de apagar el elemento de ignición; en otras palabras, después de haber establecido la combustión autosostenida, pero antes
 60 de que todo el contaminante hubiera combustionado. Ese experimento demostró que la combustión cesó en este caso muy pronto después de que se pusiera fin a la entrada de oxidante. Esto demuestra que la reacción puede

5 extinguirse retirando la corriente de inyección de oxidante. Además, después del enfriamiento, se encontró que la masa de arena resultante no estaba completamente descontaminada, conteniendo en su lugar una masa solidificada sustancial de alquitrán de hulla y arena calentadas. Esta masa no pudo retirarse del aparato experimental, por lo tanto, en este tiempo, el procedimiento de ignición se aplicó a la masa enfriada y se reinició con éxito la combustión in situ. Al final de esta segunda fase de combustión para este experimento, la arena se excavó fácilmente y no quedó nada de alquitrán de hulla observable en la zona de combustión. Esto indica que el procedimiento puede detenerse y reiniciarse con éxito, y enfatizar que el calentamiento sin combustión no logra la descontaminación, al menos para el caso ensayado.

10 Los datos experimentales anteriores demuestran claramente que el método y aparato de la presente invención son viables para la descontaminación con materiales combustibles, tales como DNAPL y LNAPL in situ.

15 Los métodos térmicos existentes son prometedores para la descontaminación de NAPL in situ, pero son prohibitivamente costosos. En la presente invención, la propagación de un frente de combustión a través de un medio poroso puede lograrse para un contenido de combustible muy bajo si la reacción se propaga hacia adelante (figura 3). La investigación ha mostrado que esto puede aplicarse a hidrocarburos líquidos incorporados en el subsuelo, y que el proceso puede modularse para propagarse de una manera óptima. La entrada de energía puede limitarse a la ignición inicial del NAPL 12 cerca de la base de la zona de la fuente 16, después de lo cual puede proceder una reacción autosostenida. La técnica muestra la ventaja de las tecnologías térmicas existentes (que incluyen una reducción eficaz de masa y la indiferencia a las diferencias de permeabilidad), y será mucho más rentable ya que no se necesita típicamente una entrada continua de energía (es decir, autosostenimiento). Además, el frente de combustión seguirá de manera natural el camino del NAPL 12 (es decir, combustible) en la fase conectada a través de los espacios porosos 36, incluso si estos no son conocidos/determinados con antelación. El método y de este modo el proceso de combustión puede por lo tanto estar autoguiado eficazmente. De este modo, se proporcionan ventajas significativas sobre tecnologías químicas, físicas y biológicas existentes, que a menudo: se dirigen ineficazmente a un volumen bajo la superficie mucho mayor que el propio NAPL 12; dependen de adiciones químicas costosas que tienden a rodear zonas de contaminante y se diluyen por debajo de niveles eficaces, y son ineficaces alrededor de regiones de baja permeabilidad sobre las que los NAPL 12 tienden a acumularse.

20

25

REIVINDICACIONES

1. Un método para descontaminar tierra (10) contaminada con un material combustible, comprendiendo el método las etapas de:
ubicar un volumen subterráneo de material combustible en la tierra que ha de descontaminarse, y
- 5 encender el material combustible para combustionar el material en un proceso de combustión sin llama, y de este modo descontaminar la tierra.
2. Un método conforme a la reivindicación 1, que comprende combustionar el material in situ.
3. Un método conforme a la reivindicación 1, que comprende combustionar el material en un proceso de combustión térmicamente autosuficiente, y preferiblemente que comprende encender el material usando un dispositivo de ignición y, una vez que el proceso de combustión es térmicamente autosuficiente, desactivar el dispositivo de ignición (30).
- 10 4. Un método conforme a cualquier reivindicación precedente, que comprende encender el material combustible para generar un frente de combustión (34) que se desplaza hacia afuera, lejos de un punto de ignición y a través del volumen de material combustible (16).
- 15 5. Un método conforme a cualquier reivindicación precedente, que comprende encender el material en una pluralidad de ubicaciones dentro del volumen de material.
6. Un método conforme a una cualquiera de las reivindicaciones 3 o 5, que comprende calentar el material combustible para encender el material.
- 20 7. Un método conforme a cualquier reivindicación precedente, que comprende seguir la combustión del material.
8. Un método conforme a cualquier reivindicación precedente, que comprende seguir la combustión para promover o mantener la combustión sin llama del material.
9. Un método conforme a la reivindicación 8, que comprende controlar el suministro de oxidante para de este modo promover o mantener la combustión sin llama.
- 25 10. Un método conforme a la reivindicación 8, que comprende suministrar un inhibidor de la combustión para mantener la combustión en un estado sin llama.
11. Un método conforme a cualquier reivindicación precedente, que comprende extinguir la combustión después de desplazarse un frente de combustión una distancia deseada a través del material.
- 30 12. Un método conforme a la reivindicación 11, que comprende extinguir la combustión después de un periodo de tiempo.
13. Un método conforme a cualquier reivindicación precedente, en el que el material combustible es subterráneo o está bajo una superficie, y comprende preferiblemente un fluido y/o un sólido.
14. El método conforme a la reivindicación 13, en el que el material combustible reside en poros definidos entre partículas sólidas de la tierra o en la red de fracturas entre bloques de roca/arcilla o en los espacios porosos de la propia matriz de roca/arcilla.
- 35

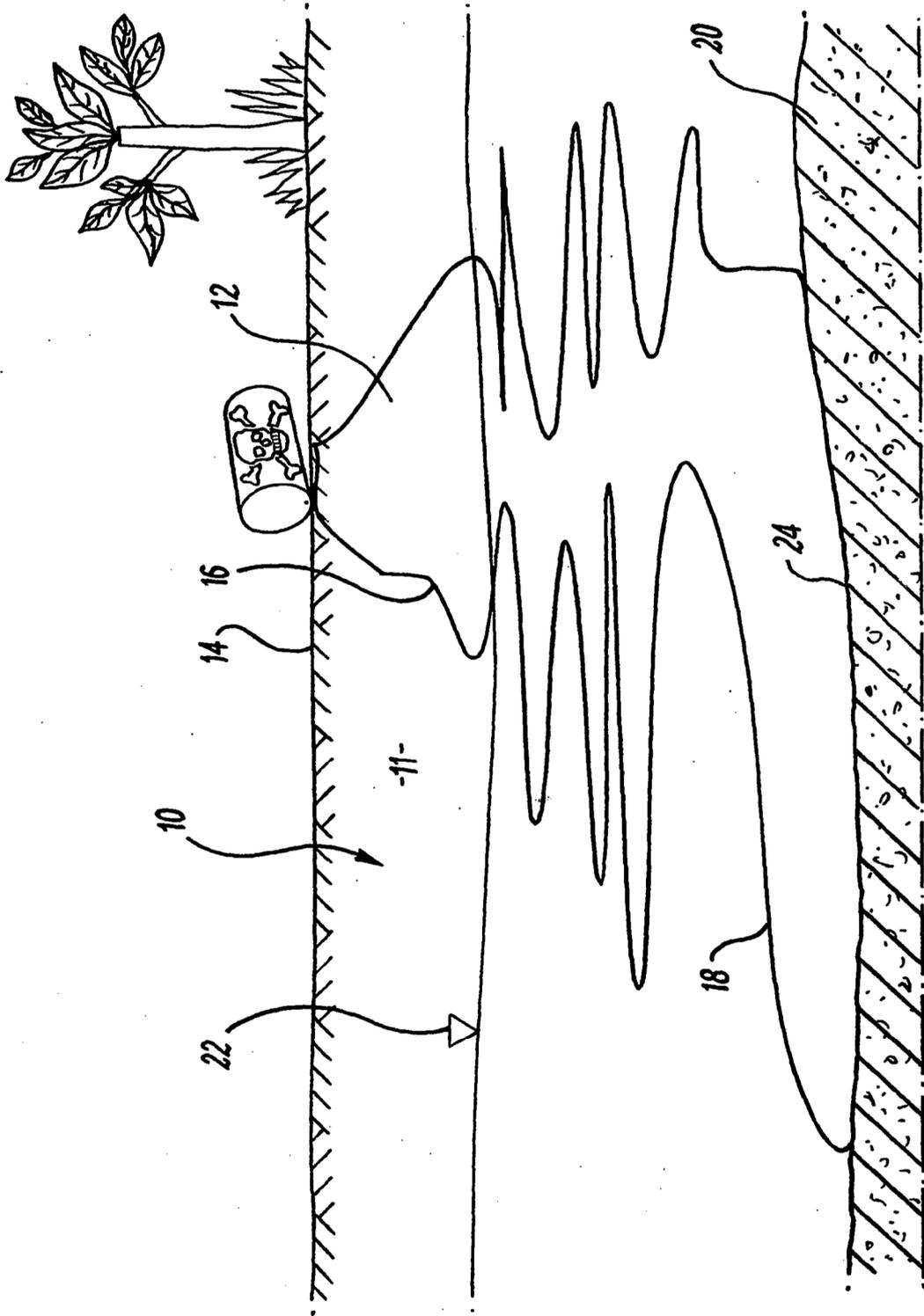
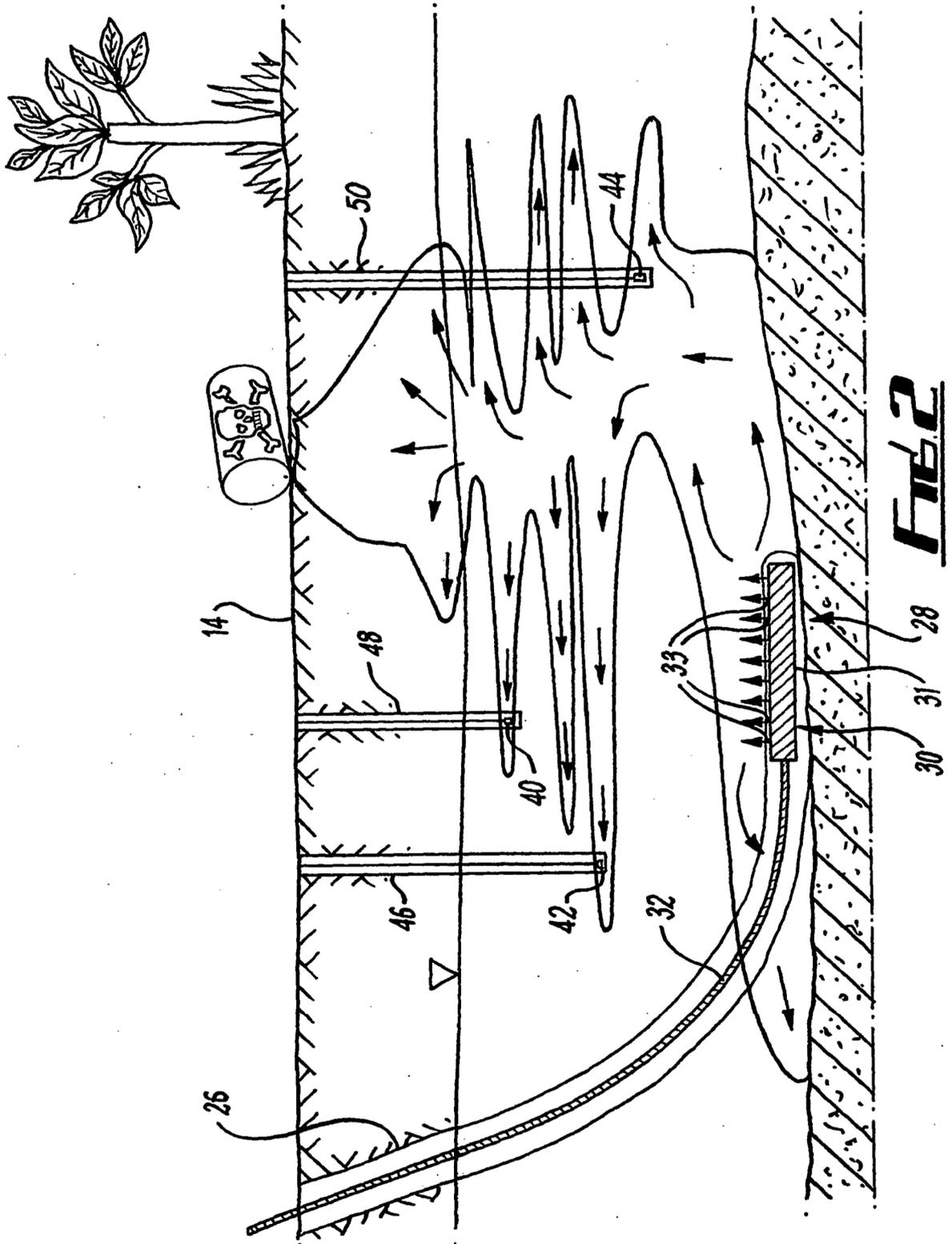


FIG. 1



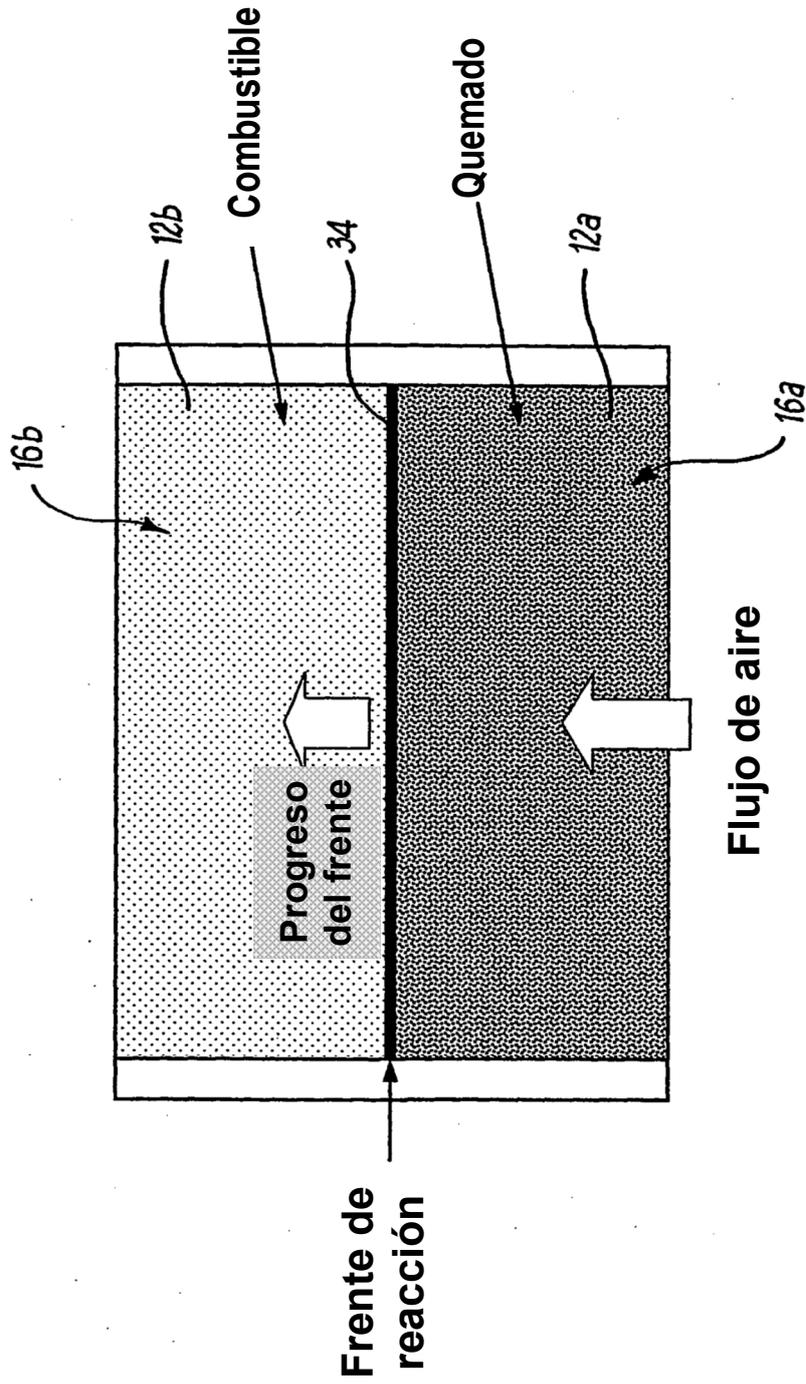


Fig. 3

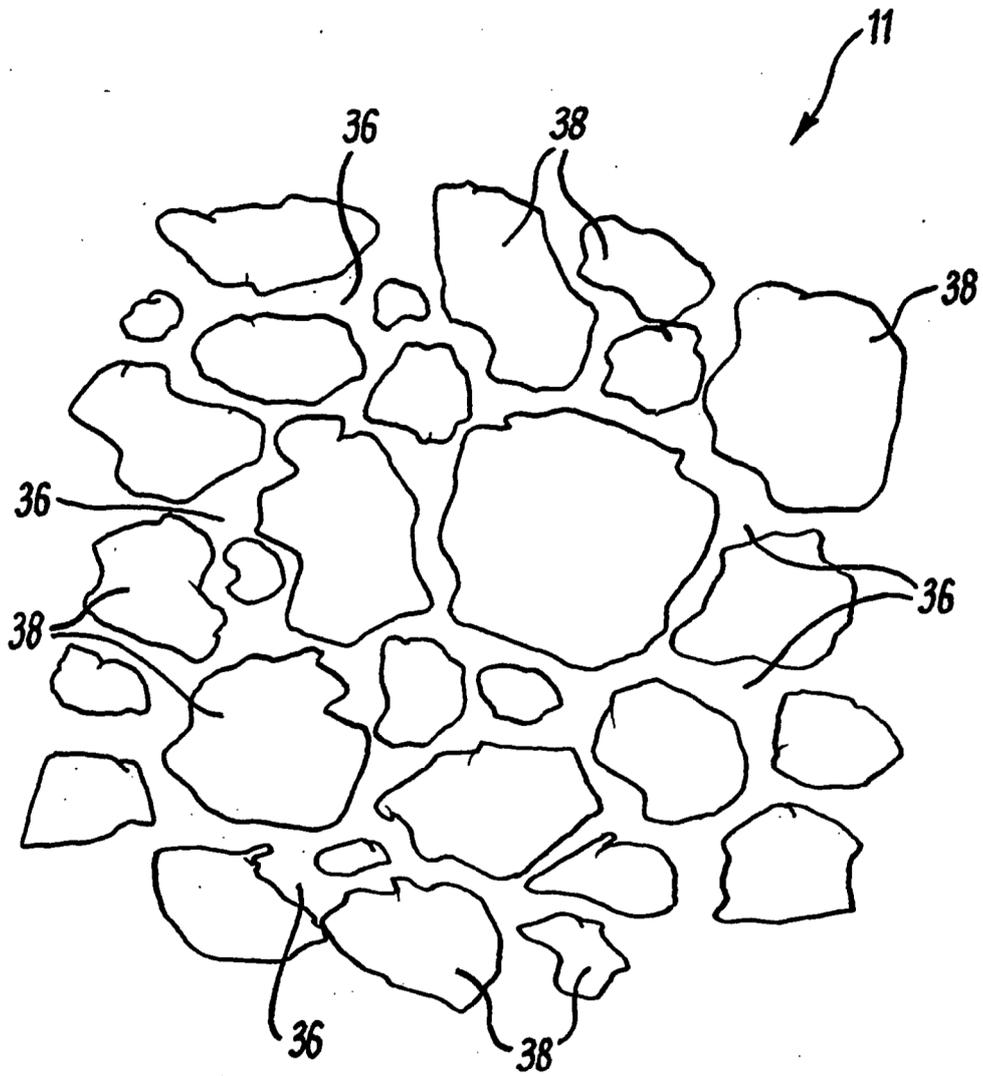


FIG. 4

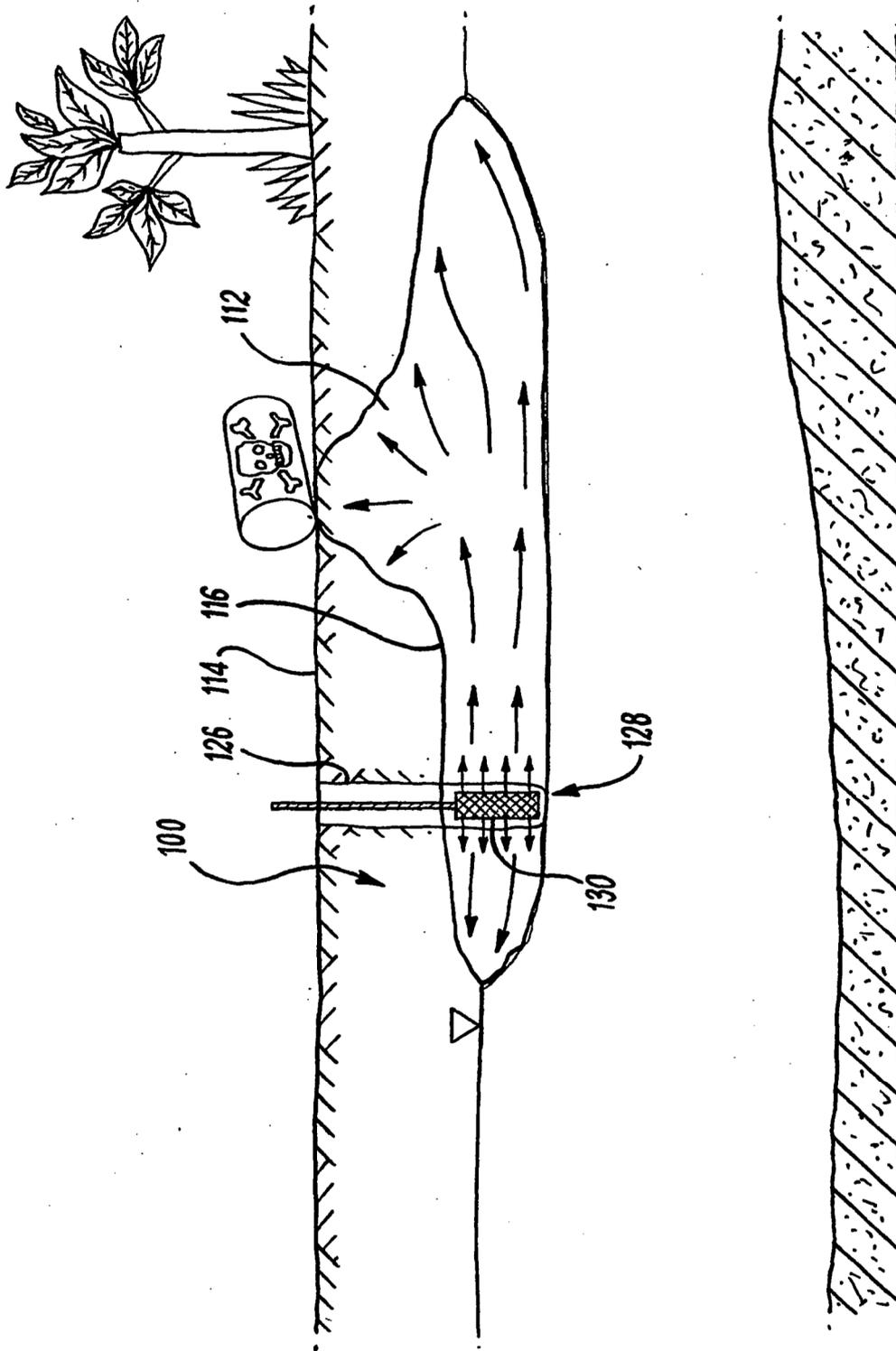


FIG. 5

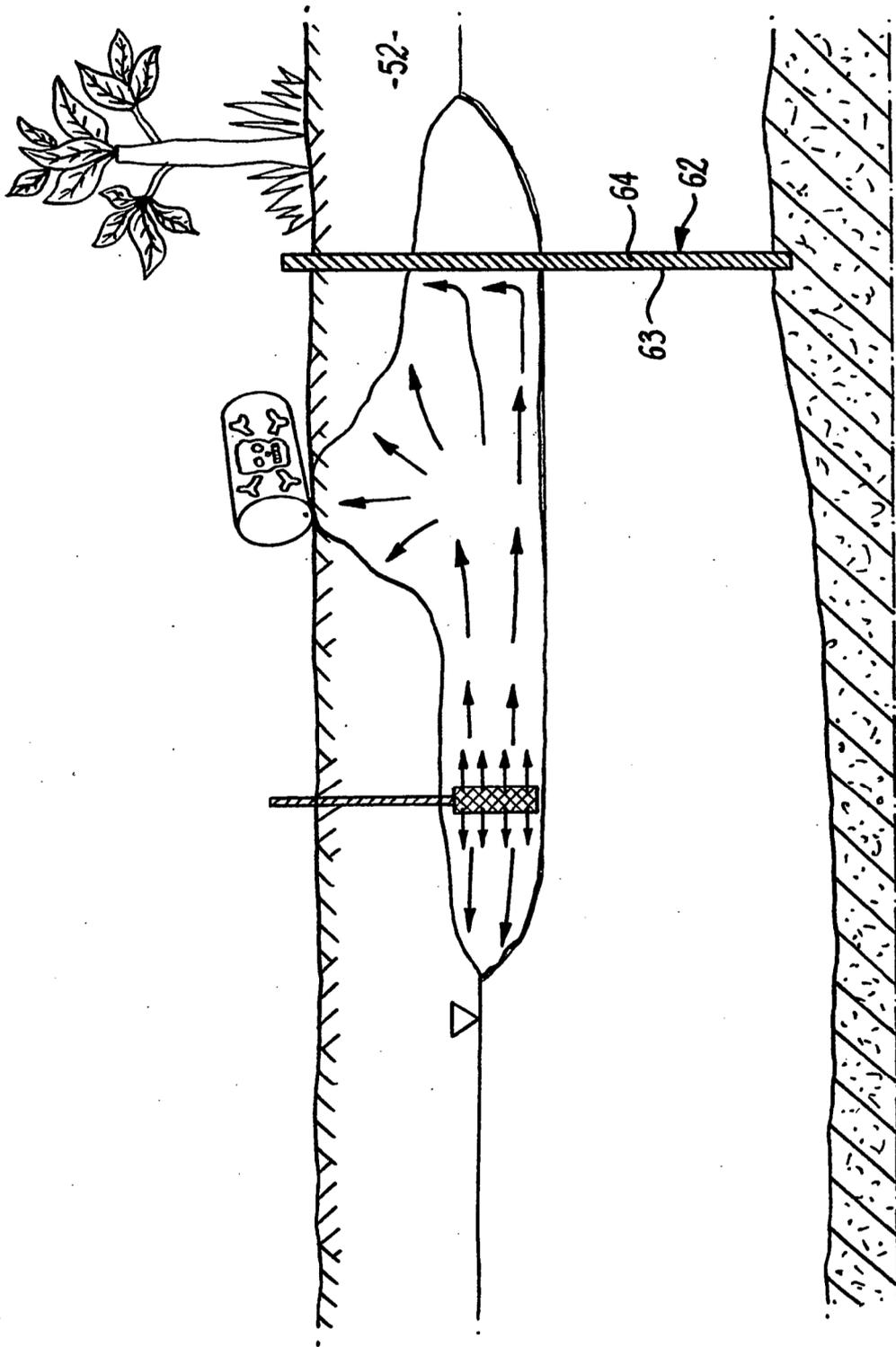


Fig. 7

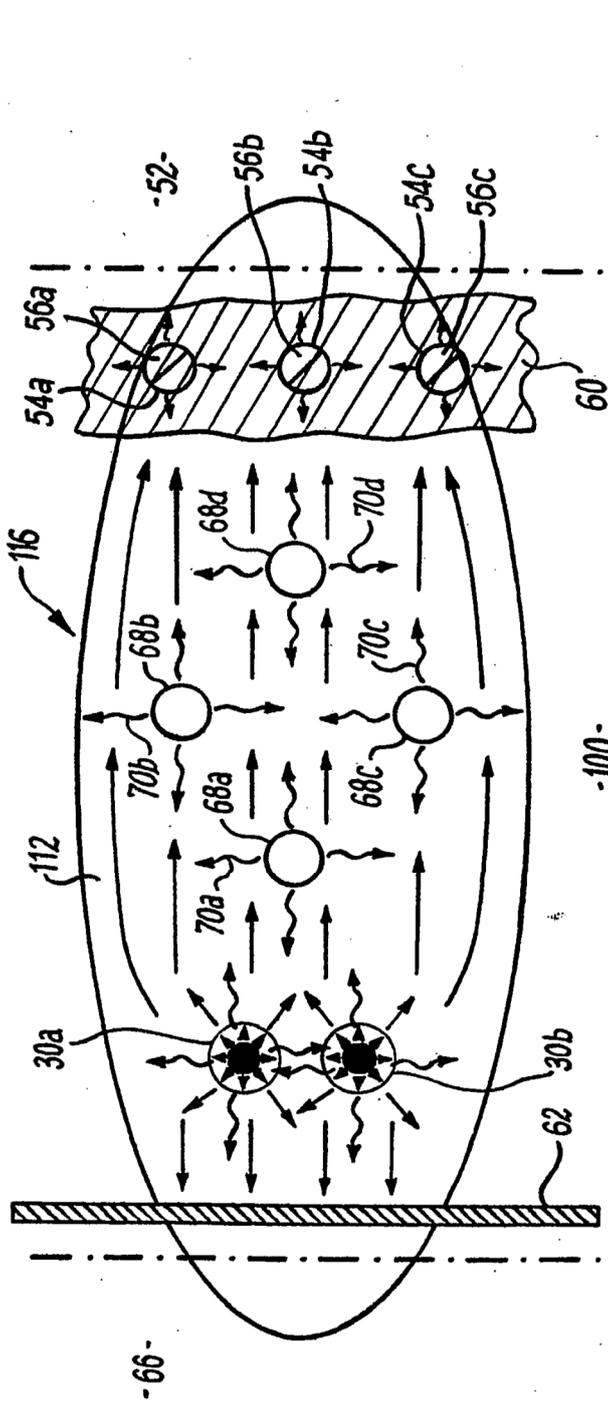
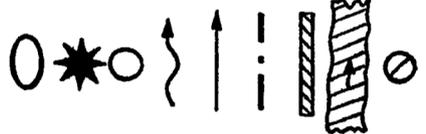


FIG. 8



- Límite de la zona de fuente de NAPL
- Pozos de ignición y de adición de oxidante
- Pozos de adición de oxidante (y seguimiento bajo la superficie y extracción de gas cerca de la superficie)
- Flujo de oxidante (por ejemplo, aire)
- Progreso del frente de combustión (es decir, destrucción de NAPL)
- Límite para el tratamiento deseado
- Barrera física de combustión (por ejemplo, muro de bentonita o introducción de láminas por percusión)
- Barrera gaseosa de combustión (por ejemplo, zona de contención de la reacción por introducción de nitrógeno)
- Pozo de inyección de gas de contención

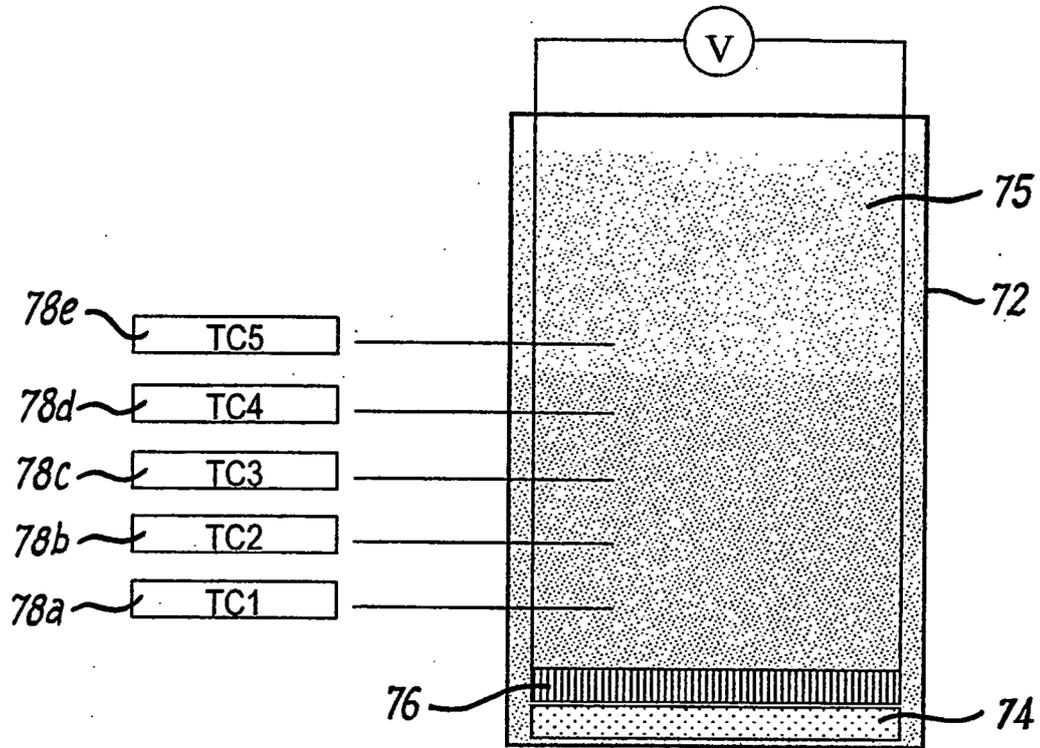


FIG. 9

Categoría	Tipo de tierra	Contaminante	¿Éxito en la combustión in situ? (sí/no)	Temp. de ignición (°C)	Temp. máx. (°C)	Tiempo hasta la ignición (incluyendo precalentamiento) (min)	Velocidad de propagación de la combustión (m/s)	¿Completamente descontaminado (inspección visual)? (sí/no) ¹	¿Completamente descontaminado (análisis de CG)? (sí/restos/N.A.) ²
Caso base	Arena gruesa	Alquitrán de hulla	Sí	400	1032	57	4,1 x 10 ⁻⁵	Sí	Restos
	Arena gruesa	Aceite vegetal	Sí	203	786	44	-	Sí	Sí
	Arena gruesa	Explosivo sólido	Sí	192	370	58	-	Sí	N.A.
	Arena gruesa	DCA/grasa	Sí	200	688	22	-	Sí	Restos
	Arena gruesa	TCE/petróleo	Sí	350	689	24	-	Sí	Restos
	Arena gruesa	Dodecano/petróleo	Sí	240	660	32	-	Sí	Restos
Variación de los medios porosos	Arena fina	Alquitrán de hulla	Sí	400	822	23	1,4 x 10 ⁻⁵	No	Restos
Heterogeneidad	2 capas: arena gruesa sobre fina	Alquitrán de hulla	Sí	425	1139	43	8,3 x 10 ⁻⁵	Sí	Sí
	2 capas de arena gruesa contaminadas separadas por una capa de arena fina limpia	Alquitrán de hulla	Sí	400	1139	47	8,3 x 10 ⁻⁵	Sí	N.A.
Variación de saturación con fluidos	Arena gruesa saturada con 40% de agua	Alquitrán de hulla	Sí	470	1040	47	7,4 x 10 ⁻⁵	Sí	Restos
	Arena gruesa	Saturación de alquitrán de hulla de 30%	Sí	400	715	48	4,4 x 10 ⁻⁵	No	Sí
Muestras de campo	Turba	Alquitrán de hulla de campo	Sí	300	1010	47	3,5 x 10 ⁻⁵	Sí	N.A.
	Arena fina	Alquitrán de hulla de campo	Sí	250	1053	52	9,8 x 10 ⁻⁵	Sí	Restos
	Arenas petrolíferas (tamaño fino de grano de arena)	Revestimiento de petróleo solidificado	Sí	300	1066	35	1,7 x 10 ⁻⁵	Sí	N.A.

¹ "Sí" = no queda contaminante observable en la zona de combustión objetivo (por medio de tacto, olor, vista o densidad aparente), "no" = una parte de la zona de combustión quedó contaminada parcialmente debido a la canalización del oxidante alrededor de esta zona; en la parte de la zona de combustión en contacto con el oxidante no queda contaminante observable.

² "Sí" = no se detectan compuestos, "restos" = compuestos detectados cerca del límite de detección del instrumento, cantidad demasiado pequeña para cuantificar, "N.A." = no analizado



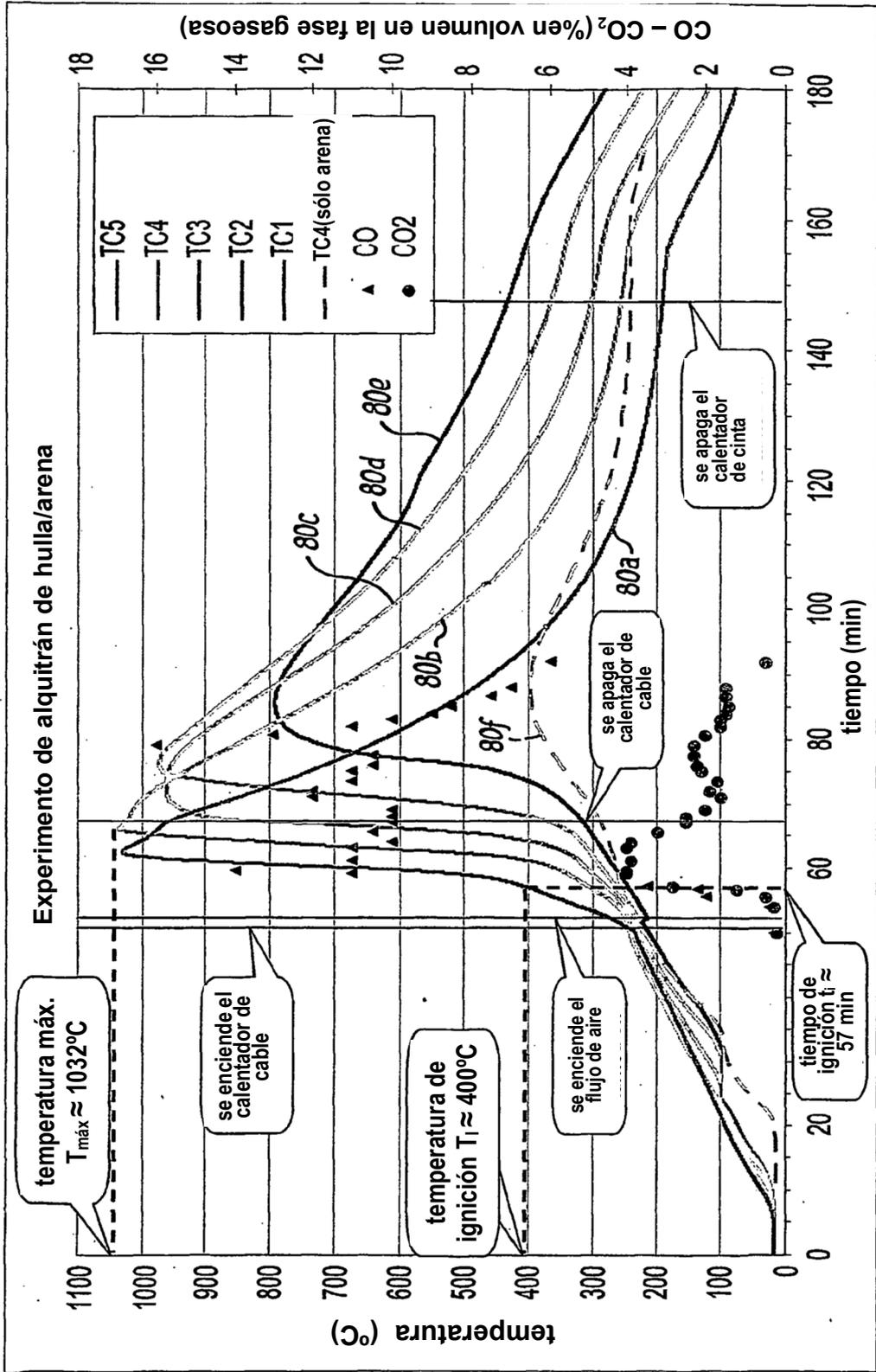


Fig. 11