(19) OFICINA ESPAÑOLA DE PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

(11) Número de publicación: **2 872 423**

(51) Int. CI.:

G01V 1/30 (2006.01)

(12) TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA T3

(96) Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **30.05.2016 E 16305624 (5)**

(97) Fecha y número de publicación de la concesión europea: **14.04.2021 EP 3101450**

(54) Título: **Estudio sísmico de detección rápida en 4D**

(30) Prioridad:

04.06.2015 US 201562170697 P

(45) Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
02.11.2021

(73) Titular/es:

SPOTLIGHT (100.0%)
72 avenue de Choisy
75013 Paris, FR

(72) Inventor/es:

ALKHATIB, HABIB

(74) Agente/Representante:

ELZABURU, S.L.P

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

Estudio sísmico de detección rápida en 4D

Antecedentes

Campo técnico

Las realizaciones de la materia divulgada en el presente documento se refieren generalmente a métodos y sistemas y, más particularmente, a mecanismos y técnicas para monitorizar una estructura geológica dada en un subsuelo de una manera rápida y eficaz.

Discusión de los antecedentes

La adquisición y el procesamiento de datos sísmicos terrestres y marinos generan una imagen de una estructura geofísica (subsuelo). Si bien esta imagen/perfil no proporciona una ubicación precisa para los recursos naturales, sugiere, para aquellos capacitados en el campo, la presencia o ausencia de estos recursos. Por lo tanto, proporcionar una imagen de alta resolución del subsuelo es un proceso continuo para la exploración de recursos naturales, que incluyen, entre otros, petróleo y/o gas.

Durante un proceso de recogida sísmica marina, como se muestra en la Figura 1, una embarcación 110 remolca una serie de receptores sísmicos 111 ubicados en transmisores 112. Los transmisores pueden estar dispuestos horizontalmente, es decir, situados a una profundidad constante con respecto a la superficie del océano 114, o pueden tener disposiciones espaciales distintas de la horizontal, por ejemplo, disposición de profundidad variable. La embarcación 110 también remolca una matriz de fuentes sísmicas 116 configurada para generar una onda sísmica 118. La onda sísmica 118 se propaga hacia abajo, hacia el fondo marino 120, y penetra en el fondo marino hasta que, finalmente, una estructura reflectante 122 (reflector) refleja la onda sísmica. La onda sísmica 124 reflejada se propaga hacia arriba hasta que es detectada por el receptor 111 en el transmisor 112. En base a estos datos sísmicos, se genera una imagen del subsuelo. Si se utiliza un solo transmisor, la imagen es una imagen bidimensional (2D). Si la embarcación remolca varios transmisores simultáneamente, la imagen es en 3D. Una imagen en 4D se obtiene cuando se realizan dos estudios en 3D para la misma área con un intervalo de tiempo determinado, generalmente meses o años.

Alternativamente, se pueden utilizar cables del fondo del océano (OBC) o nodos del fondo del océano (OBN) y sismómetros (OBS) para registrar los datos sísmicos. La Figura 2 muestra un OBC 130 que incluye varios receptores 132 distribuidos en el fondo del océano 120. La pluralidad de receptores 132 están conectados entre sí con un cable 133 que también puede estar conectado a una unidad de recogida de datos 134. Se pueden usar varios medios (por ejemplo, un vehículo submarino) para recuperar los datos sísmicos de la unidad de recogida de datos 134 y llevarlos a la embarcación 110 para su procesamiento. Se pueden generar imágenes en 3D con dicha configuración.

Para un estudio sísmico terrestre, un sistema 300 para la adquisición de datos sísmicos en 4D incluye varios receptores 312 (por ejemplo, hidrófonos, acelerómetros, etc.) colocados sobre un área 312a de un subsuelo a explorar y en contacto con la superficie 314 del suelo o en el suelo. También se colocan varias fuentes sísmicas 316 (por ejemplo, elementos vibratorios) en la superficie 314 en un área 316a en las proximidades de los receptores 312. Un dispositivo de grabación 318 está conectado a la pluralidad de receptores 312 y colocado, por ejemplo, en una estación-camión 320. Cada fuente 316 puede estar compuesta por un número variable de vibradores, típicamente entre 1 y 5, y puede incluir un controlador local 322. Puede estar presente un controlador central 324 para coordinar los tiempos de disparo de las fuentes 316. Puede usarse un sistema GPS 326 para correlacionar en el tiempo el disparo de las fuentes 316 y la adquisición de datos por los receptores 312.

Con esta configuración, las fuentes 316 se controlan para generar ondas sísmicas, y la pluralidad de receptores 312 registra las ondas reflejadas por depósitos de petróleo y/o gas y otras estructuras. El estudio sísmico puede repetirse en varios intervalos de tiempo, por ejemplo, con meses o años de diferencia, para volver a obtener imágenes del subsuelo para determinar cambios en los depósitos. Aunque la repetibilidad de las ubicaciones de la fuente y el receptor es generalmente más fácil de lograr en tierra, las variaciones causadas por los cambios cerca de la superficie pueden ser significativamente mayores que el desplazamiento de los fluidos del depósito, lo que dificulta la repetibilidad y la adquisición sísmica en 4D por intervalos. En la solicitud internacional WO 2010/077568 se divulga un sistema y un método para realizar estudios de monitorización de lapso de tiempo utilizando datos de monitorización dispersos. Se menciona que el conjunto de datos de monitorización escasamente muestreados puede obtenerse, por ejemplo, empleando, en la adquisición de datos sísmicos del estudio de monitorización, menos densidad de ubicaciones de fuente y receptor que la comúnmente empleada para un estudio de base inicial. En la publicación de solicitud de patente US 2014/0269185 se divulga un método de monitorización de lapso de tiempo basado en la teoría de muestreo por compresión, que establece que puede ser posible, si se cumplen ciertas circunstancias, reconstruir imágenes o señales con precisión con un número de muestras mucho más pequeño que los requisitos del muestreo de Nyquist, este menor conjunto de datos se denomina "datos dispersos". Esta menor cantidad de datos permite reducir las dimensiones del estudio y, por lo tanto, el coste de los estudios de monitorización. El conjunto de datos del estudio de línea de base se analiza para una o más características de escasez utilizando una o más transformadas.

Estas transformadas pueden ser una transformada de Fourier, una transformada lineal de Radon, una transformada parabólica, una transformada de ondícula, una transformada de átomo de onda o una transformada de curvatura.

Se pueden usar una o más de las técnicas indicadas anteriormente para controlar un depósito en producción. Para estos casos, el objetivo del procesamiento en 4D es determinar cómo y dónde cambian las propiedades de la tierra mediante la evaluación de las diferencias en los datos sísmicos procesados adquiridos en diferentes momentos, generalmente antes (es decir, el estudio de línea de base) y después (es decir, el estudio de monitorización) de un período de producción de fluidos de un depósito de petróleo. El éxito del procesamiento en 4D depende de la precisión con la que se compensan las diferencias en la adquisición o los cambios del subsuelo no relacionados con la producción de fluidos durante el procesamiento de datos y la generación de imágenes, para que el ruido en 4D (la diferencia de imágenes migradas no relacionadas con la producción de fluidos) se mantenga razonablemente tranquilo. Las fuentes relevantes de ruido en 4D incluyen diferencias en el muestreo del campo de ondas causadas por diferentes parámetros de adquisición de estudios entre la línea de base y la monitorización.

Actualmente, las soluciones sísmicas en 4D tienen como objetivo proporcionar una actualización de la imagen estructural en 3D del subsuelo completo. En otras palabras, tanto los estudios de base como los de monitorización recopilan una cantidad sustancial de datos sísmicos para generar una imagen estructural en 3D del subsuelo completo del volumen de interés. Una comparación del estudio de monitorización completo con el estudio de base completo anterior tiene como objetivo proporcionar los cambios en 4D inducidos por la producción de petróleo.

Sin embargo, un estudio sísmico en 3D completo adquiere una gran cantidad de datos sísmicos, lleva tiempo (semanas, si no meses), carece de repetibilidad precisa e incurre en un alto coste. Todos estos factores actúan en contra del estudio sísmico en 4D, haciendo que esta herramienta sea lenta y costosa a pesar de su utilidad.

Por lo tanto, existe la necesidad de adquirir un estudio sísmico en 4D más rápido, más barato y con más precisión.

Compendio

De acuerdo con una realización de ejemplo, existe un método para monitorizar un subsuelo durante un estudio en 4 dimensiones (4D) de acuerdo con la reivindicación 1.

De acuerdo con otra realización, existe un dispositivo informático para monitorizar un subsuelo durante un estudio en 4 dimensiones (4D) de acuerdo con la reivindicación 11.

Breve descripción de los dibujos

Los dibujos adjuntos, que se incorporan y constituyen una parte de la memoria descriptiva, ilustran una o más realizaciones y, junto con la descripción, explican estas realizaciones. En los dibujos:

La Figura 1 es un diagrama esquemático de un sistema de adquisición de datos sísmicos marinos convencional;

La Figura 2 es un diagrama esquemático de un sistema convencional de adquisición de datos sísmicos del fondo del océano;

La Figura 3 es un diagrama esquemático de un sistema convencional de adquisición de datos sísmicos terrestres;

Las Figuras 4A-4B ilustran un estudio sísmico de monitorización ligero;

Las Figuras 5A-5B ilustran además un estudio sísmico de monitorización ligero;

Las Figuras 6A-6B y 7A-7B ilustran estudios sísmicos en 4D usando imágenes estructurales completas del subsuelo e imágenes de resolución reducida para el mismo subsuelo;

La Figura 8 ilustra una imagen en 4D con una base completa y estudios sísmicos de monitorización ligeros;

Las Figuras 9A-9B ilustran una ubicación de fuente y una ubicación de sensor para un objetivo dado en un estudio de monitorización ligera;

Las Figuras 10A-10B ilustran una resolución de vóxel para una detección de base y una detección de monitorización;

La Figura 11 ilustra un estudio sísmico marino que usa un estudio de monitorización ligero;

La Figura 12 es un diagrama de flujo de un método para realizar un estudio en 4D con estudios sísmicos de monitorización ligeros y de base completo; y

La Figura 13 es un diagrama esquemático de un dispositivo informático para implementar los métodos anteriores.

Descripción detallada

La siguiente descripción de los ejemplos de realización se refiere a los dibujos adjuntos. Los mismos números de referencia en diferentes dibujos identifican elementos iguales o similares. La siguiente descripción detallada no limita la invención. En su lugar, el alcance de la invención se define por las reivindicaciones adjuntas. Las siguientes realizaciones se comentan, por simplicidad, con respecto a un estudio terrestre. Sin embargo, las realizaciones que se comentarán a continuación son igualmente aplicables a estudios terrestres, estudios marinos, estudios del fondo del océano o cualquier otro tipo de estudio que controle los cambios de tiempo de uno o más parámetros.

La referencia a lo largo de la memoria descriptiva a "una realización" o "un modo de realización" significa que un rasgo particular estructura o característica descrita en conexión con una realización se incluye en al menos una realización de la materia divulgada. Así, la aparición de la frase "en una realización" o “en un modo de realización” en diversos lugares a lo largo de la memoria descriptiva no es necesariamente referente a la misma realización. Además, los rasgos, estructuras o características particulares se pueden combinar de cualquier manera adecuada en una o más realizaciones.

Como se comentó anteriormente, obtener una imagen de un depósito es importante para producir ese depósito. Un estudio sísmico en 4D tradicional produce, en varios intervalos de tiempo (meses a años), imágenes estructurales completas sucesivas del depósito y sus alrededores mediante la repetición de un mismo estudio sísmico en 3D. Para el estudio sísmico en 4D típico, tanto el estudio de base como el de monitorización intentan hacer uso del mismo número de fuentes y sensores ubicados en las mismas posiciones. Esto significa un largo tiempo de respuesta para la generación de imágenes en 4D porque la cantidad de datos sísmicos a procesar es grande. Por ejemplo, un estudio sísmico marino típico puede usar alrededor de 10.000 sensores distribuidos a lo largo de los transmisores y cada sensor puede registrar datos cada 4 ms durante días o meses. Lo mismo ocurre con los estudios sísmicos terrestres o los estudios sísmicos del fondo del océano. La cantidad de datos sísmicos recopilados a partir de dichos estudios está en el intervalo de terabytes de información, y su procesamiento lleva meses en un superordenador dedicado (simplemente llamado aquí un dispositivo informático). La fase de adquisición lleva de semanas a meses.

Como ejemplos prácticos, una capa de desplazamiento cercana a 4D con sensores en la parte superior de una cúpula de sal en un depósito previo a la sal no aportará valor. La degradación de una imagen de banda ancha (imagen para la que se han recopilado datos sísmicos con transmisores de profundidad variable) para que coincida con una adquisición convencional en 3D también es subóptima. En la monitorización de depósitos permanentes en alta mar (PRM, que es sísmica en 4D del estado de la técnica), los estudios sísmicos durante un período de 6 meses son típicos, mientras que los cambios de producción reales ocurren en un período de tiempo mucho más corto, a menudo días, algunas semanas o un mes.

Por lo tanto, existe la necesidad de que el ingeniero del depósito y/u otras personas a cargo de monitorizar la producción del depósito, que es un campo tecnológico establecido, entreguen un resultado más rápido, comparativamente más simple de adquirir y procesar en un marco de tiempo que se alinea con objetivos de producción del mundo real.

Actualmente hay dos problemas por resolver para brindar la información necesaria: 1) cómo reducir el tiempo de disparo a una escala de tiempo que se alinee con la escala de tiempo de producción para las necesidades y requisitos de toma de decisiones, y 2) cómo emitir y registrar una señal sísmica en 4D fiable suficiente para iluminar el objetivo de interés.

El inventor se ha dado cuenta de que, en lugar de proporcionar una solución centrada en la imagen, que es el caso en la actualidad (es decir, todos los esfuerzos se dedican a generar la mejor imagen posible para los estudios de base y de monitorización), se proporciona una solución centrada en la información (es decir, obtener una imagen de menor resolución para regiones del subsuelo elegidas estratégicamente) serviría mejor a las necesidades del ingeniero del depósito. Este concepto se explora ahora con más detalle.

En última instancia, los estudios en 4D están destinados a reducir las incertidumbres de producción en el campo. Cada campo/depósito tiene sus propias áreas de incertidumbre con respecto a la dinámica del flujo durante la producción. Para hacer frente a estas incertidumbres, los responsables de la producción construyen varios escenarios y/o mecanismos de producción para tratar de evaluar los riesgos de producción asociados. Los estudios del pozo se pueden combinar con información sísmica en 4D para proporcionar pronósticos de producción más precisos mediante la validación de uno o más escenarios y/o mecanismos de producción. En casos extremos, ninguno de los escenarios y/o mecanismos de producción previstos coincide con los estudios y es necesario construir nuevos escenarios y/o mecanismos de producción. Una herramienta muy eficaz y útil para generar y/o validar los escenarios de producción y/o mecanismos de producción es el estudio sísmico en 4D. Sin embargo, como se discutió anteriormente, una sísmica en 4D convencional proporciona actualizaciones de marco de tiempo prolongado (por ejemplo, seis meses a un año en PRM, más con 4D convencionales) mientras que las decisiones de producción del depósito deben tomarse en una escala de tiempo más corta, por ejemplo, mensual o semanalmente e incluso en algún momento todos los días.

El inventor ha observado que para un campo/depósito de producción dado, el modelo y mecanismo de flujo del ingeniero del depósito (que se utiliza para administrar la producción del pozo) no son inciertos en todas partes. Hay

algunas áreas "inciertas" sobre la extensión total del volumen del depósito y el nivel de incertidumbre de estas áreas puede variar de un área a otra. Los escenarios de producción y/o los mecanismos de producción tienen en cuenta estos niveles de incertidumbre. Sin embargo, para validar o descartar algunos de estos escenarios y/o mecanismos de producción, no es necesario proporcionar múltiples imágenes estructurales completas del subsuelo, sino solo información en 4D fiable enfocada en las áreas específicas de incertidumbre. En otras palabras, el inventor ha observado que se puede obtener buena información sobre los diversos escenarios utilizando el estudio sísmico en 3D completo (por ejemplo, el estudio de base) para adquirir datos ligeros y enfocados para detectar cambios en estas áreas estratégicas específicas de incertidumbre. En una aplicación, el estudio de monitorización de resolución más baja "muestrea" los objetivos seleccionados y no todo el campo/depósito, como es el caso del estudio de base completo. Un estudio de monitorización de menor resolución da como resultado la capacidad de determinar fácil y rápidamente el nivel del depósito o un efecto de característica relacionado con varios escenarios de producción, lo que permite al ingeniero examinar rápidamente esos enfoques.

Para ilustrar este concepto, considere el siguiente ejemplo ilustrado en las Figuras 4A-4B. La Figura 4A muestra un área 400 que contiene un depósito de deposición. Se espera que el depósito esté allí, pero en una imagen real del área 400, no se puede ver. Dos pozos 404 y 406 están presentes por encima del depósito de deposición. El petróleo en el depósito de deposición fluye desde el pozo inyector 404 hacia el pozo productor 406. Una falla 408 está presente en el depósito. Sobre la base de un estudio sísmico de base completo (estudio sísmico en 3D completo), el ingeniero del depósito puede definir tres posibles rutas de producción 420, 422 y 424 y un número infinito de escenarios para tener en cuenta cada posible contribución a la producción del canal.

El ingeniero del depósito busca principalmente respuestas a las siguientes preguntas: 1) ¿El flujo pasa por todos los canales? 2) ¿La falla es permeable? 3) Si la falla no es permeable, ¿hacia dónde va el flujo? Para el ejemplo ilustrado en la Figura 4A, solo los estudios fiables lejos de los pozos pueden proporcionar suficiente información para construir un escenario de producción preciso y tomar las decisiones de producción correctas. Si bien una imagen sísmica en 4D puede producir este tipo de imagen, llevará mucho tiempo. Sin embargo, la información sísmica en 4D se puede obtener mucho más rápido y a una fracción del coste de obtener la imagen en 4D completa si solo se realizan algunos estudios reducidos, como se ilustra en la Figura 4B. La Figura 4B muestra cuatro mosaicos (ubicaciones) 430, 432, 434 y 436 que se muestrean con ondas sísmicas para adquirir datos sísmicos. La resolución de estos mosaicos es mucho más baja que la resolución de un estudio sísmico en 3D tradicional, ya que solo se requieren estudios suficientes para reducir las incertidumbres y no una imagen de resolución completa. La Figura 4B muestra la resolución de información en 4D necesaria para responder a las incertidumbres relacionadas con la pregunta n.º 1 anterior. Para las otras preguntas, se necesitan más estudios y están directamente vinculados a la respuesta a la pregunta n.º 1. De acuerdo con esta realización, las medidas mostradas en la Figura 4B corresponden al estudio de monitorización. El número de medidas se reduce mucho en relación con un estudio sísmico en 4D completo que se realiza actualmente.

En una realización, se realiza un estudio sísmico en 3D de base completa inicial para obtener una imagen completa del depósito 402, como se ilustra en la Figura 5A. También se muestran en esta figura los canales discutidos anteriormente. Para monitorizar el flujo de aceite en el depósito, en lugar de realizar otro estudio en 3D completo, como se realiza tradicionalmente, de acuerdo con esta realización se realiza un estudio de monitorización más limitado (llamada aquí "estudio de monitorización ligero"), como se ilustra en la Figura 5B. Nótese que se seleccionan varios mosaicos 530 para cubrir solo el área/volumen donde se espera el flujo de aceite, y estos mosaicos se iluminan con un número reducido de fuentes y los datos sísmicos se registran con un número reducido de sensores. Dependiendo de la resolución mínima esperada necesaria para evaluar una característica correspondiente, cada mosaico puede iluminarse con una cantidad diferente de energía para obtener diferentes resoluciones. Por ejemplo, la Figura 5B muestra que el mosaico 530 tiene una resolución baja, mientras que el mosaico 532 tiene una resolución más alta. Cuanto más oscuro sea el mosaico, mayor será la resolución. Incluso con la resolución más alta del mosaico 532, no se forma la imagen de ningún mosaico con una resolución tan alta como un estudio sísmico en 3D completo tradicional. En los casos en los que solo sean interesantes los cambios de producción de meses a semanas, los datos sísmicos en 3D completos iniciales (cuando se adquieren años antes de los cambios) no se pueden utilizar como un estudio de base. En este caso, es necesario realizar un nuevo estudio de monitorización ligero y un nuevo estudio de base ligero. El estudio en 3D completo original se seguirá utilizando para encontrar la ubicación óptima de las fuentes/receptores y las frecuencias. También debe tenerse en cuenta que en lugar de tener un sistema de sensores y fuentes que son móviles, se puede utilizar un sistema permanente o semipermanente que detecte cambios de manera continua. En este caso, los datos sísmicos de los estudios de base y de monitorización deben ser sustituidos por los datos sísmicos continuos adquiridos con el sistema permanente o semipermanente.

Por ejemplo, se podría realizar una monitorización continua del sistema anterior cuando las incertidumbres sean críticas. En otras palabras, si un estudio sísmico en 3D completo tradicional alcanza una resolución determinada, las resoluciones utilizadas para los monitores en estas realizaciones son al menos un orden de magnitud más bajas. En algunas realizaciones, la resolución es al menos dos órdenes de magnitud más baja que un estudio sísmico en 3D completo tradicional. La resolución de cada mosaico se selecciona en función de las características que se van a monitorizar.

A partir de estos ejemplos, se observa que un estudio de monitorización ligero no monitoriza todo el volumen como el estudio de base, es decir, el estudio de monitorización ligero es más pequeño en tamaño de área que el estudio de base, y/o la resolución del estudio de monitorización ligero es menor que la resolución del estudio de base completo.

Ahora se analiza el grado de reducción de volumen y/o reducción de resolución del estudio de monitorización ligero en relación con el estudio de base.

En una realización, si el estudio de base usa miles de receptores para registrar los datos sísmicos, el estudio de monitorización ligero usa cientos de receptores. Más precisamente, en una realización, el estudio de monitorización ligero utiliza no más de 100 ubicaciones para localizar las fuentes y los sensores. Por ejemplo, el estudio de monitorización ligero puede usar una ubicación de fuente y 99 ubicaciones de sensores. En otro ejemplo, el estudio de monitorización ligero puede usar una ubicación de fuente y 49 ubicaciones de sensores, hasta un total de 50 ubicaciones de fuentes y sensores. En otro ejemplo más, el estudio de monitorización ligero utiliza una ubicación de fuente y 19 ubicaciones de sensores, hasta un total de 20 ubicaciones de fuentes y sensores. La relación entre las ubicaciones de las fuentes y las ubicaciones de los sensores puede variar para un número determinado de ubicaciones totales. En otro ejemplo más, el estudio de monitorización usa 10 ubicaciones totales para las fuentes y los sensores. En otra realización más, el estudio de monitorización usa una ubicación de fuente única y una ubicación de sensor única. Esta última realización consigue estudios rápidos y económicos, proporcionando suficiente información para caracterizar una característica de interés.

Por ejemplo, la Figura 6A muestra una imagen estructural en 3D completa del modelo del depósito que se logra con el estudio de base en el momento t0. En la Figura 7A se muestra un estudio de monitorización completo posterior en el tiempo, e ilustra los cambios 700 que se producen dentro del depósito durante un período de 6 meses. Sin embargo, esta imagen tradicional en 4D es costosa y lenta, como se discutió anteriormente. La Figura 6B muestra una imagen imperfecta del modelo del depósito (es decir, una imagen de baja resolución lograda con el estudio de monitorización ligero) en el momento t0 y la Figura 7B también muestra una imagen imperfecta del mismo depósito tomada en un momento posterior t1. Las imágenes mostradas en las Figuras 6B y 7B pueden ser 150 veces menos precisas que las imágenes mostradas en las Figuras 6A y 7A. Sin embargo, teniendo en cuenta la Figura 6A, la diferencia entre las dos imágenes (por ejemplo, las que se muestran en las Figuras 6B y 7B) produce suficiente información sobre el cambio que se produce en el depósito para responder a la pregunta "¿esta área del depósito está activa?" en forma afirmativa, como se ilustra en la Figura 8. Debido a las imágenes de baja resolución que se muestran en las Figuras 6B y 7B, lo que significa menos adquisición de datos y un tiempo de procesamiento más corto, la diferencia de tiempo t1-t0 puede ser pequeña, por ejemplo, días o semanas en lugar de meses.

Debe tenerse en cuenta que un estudio sísmico completo se entiende aquí como un estudio sísmico que incluye miles de registros de datos sísmicos, mientras que un estudio sísmico ligero se entiende que incluye no más de cien registros de datos sísmicos y, a veces, en el extremo, solo un registro de datos sísmicos. Además, un estudio sísmico ligero utiliza un enfoque de azimut estrecho y la fuente o fuentes involucradas en dicho estudio emiten una banda de frecuencia limitada, preferentemente un martilleo de monofrecuencias. Esto significa que se aplican múltiples monofrecuencias a la fuente en un orden sucesivo, sin cubrir la banda sísmica completa, como lo hace una señal de barrido. De esta manera, un estudio ligero genera una pequeña fracción (por ejemplo, menos del 20%) de los datos sísmicos generados por un estudio sísmico completo. Esto significa que el estudio sísmico ligero se puede realizar rápidamente (por ejemplo, horas o días), y los datos generados por dicho estudio sísmico se pueden procesar rápidamente (por ejemplo, horas o días). Por lo tanto, los resultados del estudio de monitorización ligero se pueden obtener en horas o días, lo que es muy útil para el ingeniero del depósito.

Las Figuras 6B y 7B ilustran el concepto de "información sísmica", que requiere menos adquisición y procesamiento que el concepto de "imagen sísmica", que se ilustra en las Figuras 6A y 7A. Utilizando el modelo de flujo del ingeniero del depósito o el mecanismo de producción elaborado con información de exploración, los ingenieros de depósitos pueden "interpretar" información subestructural fiable y reducir las incertidumbres utilizando la información obtenida del estudio sísmico ligero. Incluso si la incertidumbre de la producción está relacionada con la idea de que una capa está activa o no, una sísmica en 4D convencional habría obtenido imágenes de este depósito con la resolución estructural completa (es decir, un estudio completo), proporcionando demasiada información con un tiempo de respuesta más prolongado para un coste prohibitivo.

Para obtener sísmica centrada en información en 4D, no hay necesidad de azimut amplio o desplazamientos, asumiendo que hay suficiente repetibilidad para obtener información fiable y valiosa. En una realización, un solo desplazamiento, un solo azimut y una o varias adquisiciones de monofrecuencias proporcionarán la información necesaria.

Por lo tanto, de acuerdo con una realización, una adquisición sísmica en 4D de monofrecuencias de desplazamiento de azimut único (estudio extraligero) disminuye el número de ubicaciones de disparo/recepción y el coste y el tiempo de respuesta asociados. Este estudio ultraligero está impulsado por la producción para proporcionar información fiable con la resolución correcta y en la ubicación correcta, lo que reduce las incertidumbres de producción. Los conceptos anteriores son aplicables en tierra y en alta mar.

En la Figura 9A se ilustra un estudio típico de monitorización ligero, que muestra un objetivo 900 identificado por el ingeniero del depósito como que requiere monitorización adicional. Un volumen conocido 902 está presente por encima del objetivo. El volumen puede ser volcánico, evaporado o bolsas de gas poco profundas, que ya formaron imágenes mediante el estudio de base completo. Por lo tanto, en base a la información obtenida del estudio de base completo y el objetivo requerido (ubicación y cambios esperados, si están disponibles), se pueden calcular la ubicación

de fuente óptima 904 y la ubicación de sensor óptima 906. Se pueden colocar una o más fuentes y/o sensores en estas ubicaciones para generar y recopilar los datos sísmicos necesarios. La Figura 9B muestra una vista de pájaro de los elementos mostrados en la Figura 9A.

Aunque las Figuras 9A y 9B muestran una ubicación de fuente única y una ubicación de sensor único, el estudio de monitorización ligero puede incluir hasta 100 ubicaciones de fuentes y sensores, donde la división entre ubicaciones de fuentes y sensores puede ser cualquiera. El número de ubicaciones de fuentes y sensores viene dictado por el número de objetivos de los que se van a formar imágenes y la cantidad de información necesaria para discriminar los escenarios del ingeniero del depósito después de una formación de imágenes en 3D completa. En una realización, es posible tener un estudio de base completo seguido de un par de estudios de monitorización ligeros seguidos de un estudio de monitorización completo seguido de otros estudios de monitorización ligeros. Uno o más de los estudios de monitorización ligeros pueden reemplazarse con estudios ligeros adicionales. Los escenarios/mecanismos del ingeniero se pueden validar en función de la información proporcionada por un estudio de monitorización ligero en lugar de un estudio de monitorización completo. Aunque el método discutido en el presente documento es muy escaso, proporciona información fiable.

Un diseño de estudio sísmico centrado en información en 4D debe considerar recibir suficiente relación con señal (S/N) en 4D para obtener información fiable con muchos menos puntos de estudio. Para ello, se deben tener en cuenta las siguientes consideraciones:

- Maximizar la S/N en el objetivo → Definir las ubicaciones correctas del receptor/fuente y las frecuencias óptimas

- Minimizar el ruido 4D → Fuente y receptor estacionarios

- Adaptabilidad → Las incertidumbres de producción están evolucionando con el tiempo y los estudios recopilados, la solución debe poder adaptarse rápidamente a estos cambios para proporcionar siempre información valiosa.

Estas consideraciones se discuten ahora con más detalle. Para maximizar la S/N en el objetivo, es necesario determinar la ubicación del receptor y de la fuente. Conociendo la estructura del subsuelo y la propagación del campo de olas del estudio sísmico en 3D completo, es posible calcular, conociendo la ubicación del objetivo 900 (ver las Figuras 9A y 9B) y cuando esté disponible, los cambios esperados, las ubicaciones óptimas de las fuentes y las ubicaciones de los sensores. Para hacerlo, se puede realizar la desmigración y/o el trazado de rayos inverso desde el objetivo utilizando los datos completos del estudio en 3D. Debe tenerse en cuenta que las Figuras 9A y 9B muestran una ubicación de fuente única y una ubicación de sensor único y un trazado de rayos óptimo. Sin embargo, se pueden calcular múltiples ubicaciones para el estudio de monitorización ligero. Estos cálculos también tienen en cuenta el modelo dinámico del depósito (efecto esperado de la clase AVO) y la resolución necesaria para la posición objetivo.

Además de determinar la ubicación de la fuente y el sensor, los cálculos determinan qué frecuencia o frecuencias debe emitir la fuente. En una realización, se determina una sola frecuencia para una fuente determinada. En otra realización, se determinan varias monofrecuencias. En los estudios sísmicos convencionales en 3D o 4D, se utiliza una señal de fuente de banda ancha para obtener tantas frecuencias como sea posible para las imágenes estructurales. Este intervalo tiene como objetivo incluir al menos el intervalo de cero a 200 Hz. En estas condiciones, la cuadrícula de fuente/receptor XY a menudo restringe la resolución XY (es decir, la densidad de la cuadrícula del receptor proporciona la resolución XY), mientras que la resolución Z se define por la absorción Q de las altas frecuencias en la tierra. Los vóxeles (o cubos) sísmicos convencionales en 3D y 4D son a menudo vóxeles anisotrópicos, como se muestra en la Figura 10A.

Para una capa de depósito determinada, la exploración sísmica proporciona información sobre la velocidad sísmica en el objetivo. Estas velocidades se utilizan para calcular las monofrecuencias óptimas (o solo una) para obtener las resoluciones X-Y y Z necesarias para reducir las incertidumbres, como se ilustra en la Figura 10B. Debe tenerse en cuenta que el cubo (en realidad más un elipsoide) en la Figura 10B es mucho mayor que en la Figura 10A porque la resolución necesaria es mucho menor. Para cada caso, se necesita una ubicación de fuente/receptor. Las resoluciones óptimas X-Y y Z podrían ser diferentes si aportan valor a la comprensión del depósito.

El siguiente ejemplo se proporciona para esta realización. La resolución sísmica de un volumen dado varía con la frecuencia dependiendo de la velocidad sísmica en el volumen. Suponiendo una velocidad sísmica de 5500 m/s en un carbonato previo a la sal, se puede demostrar que la resolución en metros respecto a la frecuencia viene dada por la Tabla 1 (para un desplazamiento cero):

Resolución (m)	Frecuencia (Hz)
50	27
100	14
150	9
200	7

Resolución (m)	Frecuencia (Hz)
275	5

Según esta tabla, si las incertidumbres de producción asociadas con el área 400 son relevantes para un vóxel que tiene un tamaño de 150x150x150 m al nivel del depósito, no hay razón para enviar una señal de fuente por encima o por debajo de 9 Hz. Por lo tanto, el envío de una señal de fuente de frecuencia única de 9 Hz será óptimo. En una aplicación, la fuente envía un intervalo de frecuencia (barrido) centrado en los 9 Hz. El intervalo de frecuencia puede ser de 2, 4, 8 o 10 Hz.

Un martilleo de varias señales de fuente de monofrecuencia para información sísmica en 4D (para estudio de monitorización extraligero) también proporciona las siguientes ventajas: maximiza la fuente de energía para la frecuencia óptima, aumenta la relación S/N en 4D, es más fácil repetir una señal de fuente de monofrecuencia, y facilita un enfoque de procesamiento sísmico en 4D basado en desplazamiento de fase. Martillar varias señales de monofrecuencia también puede facilitar la precisión de localización del área estratégica. Por ejemplo, es posible utilizar la imagen fantasma y cambiar la profundidad de la fuente para aportar algo de directividad a las fuentes.

Minimizar el ruido en 4D es la siguiente consideración que se discutirá con respecto al estudio de monitorización (extra) ligero. Para reducir las incertidumbres, los ingenieros de depósitos necesitan información fiable. En este sentido, es necesario reducir el ruido en 4D. Todos los ruidos repetibles durante la ventana de lapso de tiempo de la producción, tal como tuberías activas o múltiplos internas, no se consideran ruidos en 4D (e incluso pueden usarse como una señal sísmica). Todo ruido en 4D no repetible debe reducirse y este ruido incluye:

- Los receptores y las fuentes deben poder colocarse o reposicionarse exactamente en la misma ubicación para cada estudio, lo cual es mucho más fácil con un estudio de monitorización (extra) ligero en el que se utiliza un número muy bajo de fuentes y receptores;

- Una solución de fuente/receptor estacionaria permitirá el disparo y la grabación continuos. Dado el bajo número de fuentes y sensores utilizados por el estudio de monitorización ligero, por ejemplo, una fuente y un sensor, es mucho más fácil mantener la fuente y el sensor permanentemente en sus ubicaciones para que sus posiciones no cambien de un estudio a otro;

- La energía de la señal de la fuente debe ajustarse para maximizar la relación S/N a nivel del depósito;

- La corrección estática debe realizarse con cuidado; y

- En tierra, el posicionamiento de las fuentes y los sensores debajo de la zona de intemperismo puede ser obligatorio.

La adaptabilidad es la siguiente consideración que se discutirá con respecto al estudio de monitorización ligero. Las incertidumbres de producción están evolucionando con el tiempo y, por lo tanto, sus medidas también deberían evolucionar. Un estudio de monitorización ligero debería poder adaptarse rápidamente a las nuevas incertidumbres que surgen. Disponer de una o varias fuentes capaces de adaptar su frecuencia de señal, energía y posición a las nuevas necesidades consigue la adaptabilidad necesaria. Es posible que sea necesario adaptar la ubicación del sensor a la nueva ubicación; por lo tanto, un sensor ágil permitirá tal flexibilidad mientras evita los costes adicionales provenientes de la cobertura del receptor de capa.

Para ejemplificar una o más de estas consideraciones, se considera que la Figura 11 que muestra un sistema de adquisición de datos sísmicos marinos 1100. El área 1101 ha sido estudiada con un estudio sísmico de base completo. Dos pozos 1104 y 1106 están ubicados sobre el depósito 1102. Sobre la base de la imagen estructural obtenida del estudio de base completo, se identifican varios objetivos y se determinan los mosaicos 1110 asociados. Algunos de los mosaicos 1120 son grandes (resolución muy baja) mientras que otros mosaicos 1122 son pequeños (resolución más alta, pero aún más baja que un estudio de base completo). Independientemente del mosaico, esta realización muestra un único AUV 1130 por mosaico. Así, según esta realización, es posible tener zonas con diferentes tipos de resolución. Como se discutió anteriormente, aunque esta realización específica muestra un sensor (AUV) por objetivo (el objetivo se describe mediante un mosaico correspondiente), es posible tener una combinación de hasta cien ubicaciones de sensores y fuentes por objetivo (o mosaico) y utilizar una grabadora convencional (no AUV) si es lo suficientemente ágil.

En términos de procesamiento, en una realización, los estudios de desplazamiento de fase a nivel de depósito se consideran durante el procesamiento. El procesamiento "basado en fases" es mucho más rápido y sencillo que el procesamiento convencional. Además, el procesamiento basado en fases favorece la reducción de los plazos de entrega. En las áreas subterráneas afectadas por la producción de petróleo del pozo, se modifican las propiedades elásticas de las rocas a nivel del depósito. Estos cambios inducen un cambio de velocidad sísmica que modificará la "fase" de la señal en el depósito. Comparando trazo por trazo para una frecuencia dada, el estudio de base completa y de monitorización ligero (en las porciones del estudio de base que tienen trazos correspondientes en la monitorización ligera) indicarán un cambio en la fase en el nivel del depósito solo si el área analizada (objetivo en Figuras 9A y 9B) se ve afectada por la producción de petróleo. Un procesamiento tan rápido proporcionará una

información bastante "binaria" sobre los cambios en el depósito en lugar de una actualización completa de la imagen estructural. Sin embargo, esta es la información que necesita el ingeniero del depósito para validar sus escenarios. Por lo tanto, al combinar el estudio de monitorización ligero con un procesamiento basado en fases, el ingeniero del depósito podría recibir datos sísmicos que indiquen cambios en el depósito casi en tiempo real, a bajo coste.

De acuerdo con una realización, un método para monitorizar un depósito subterráneo durante un estudio en 4D incluye adquirir un estudio de base completo y uno o más estudios de monitorización ligeros para un área dada. Más específicamente, el método incluye, como se ilustra en la Figura 12, una etapa 1200 de obtener un estudio completo del depósito (por ejemplo, realizar el estudio o recibir los datos sísmicos del estudio), una etapa 1202 de generar un modelo de flujo o mecanismo del depósito (la generación de un modelo de flujo o mecanismo de producción es conocido en la técnica y no se describe aquí), y una etapa 1204 de identificación de un área del subsuelo que necesita ser monitorizada en base a la información de la etapa 1202. Debe tenerse en cuenta que estas etapas pueden ser realizadas por el operador de petróleo, mientras que las siguientes etapas pueden ser realizadas por una empresa de servicios de petróleo. También debe tenerse en cuenta que algunas etapas se pueden realizar más tarde. El método también incluye una etapa 1206 de identificar ubicaciones óptimas para los receptores y/o fuentes y frecuencias de fuente para el área que necesita ser monitorizada. Esta etapa se realiza en función de la información obtenida del estudio completo utilizando, por ejemplo, el algoritmo de desmigración y/o trazado de rayos inverso. Como resultado de esta etapa, el método avanza a la etapa 1208 para realizar un estudio de monitorización ligero para el área (por ejemplo, realizar el estudio o recibir los datos sísmicos del estudio), y se realiza un estudio de base ligero para el área en la etapa 1212, y esta información junto con la información de la etapa 1208 se usa en la etapa 1210 para generar la imagen del área, es decir, la imagen se genera basándose en una comparación del estudio de base ligero y el estudio de monitorización ligero. La información recopilada se utiliza, como se discutió anteriormente, para monitorizar cambios en el depósito, para mejorar su producción. El estudio de base completo utiliza más de 100 ubicaciones de fuentes y sensores, mientras que el estudio de monitorización ligero utiliza menos de 100 ubicaciones de fuentes y sensores, y el estudio de monitorización ligero se realiza más tarde que el estudio de base completo.

El método puede incluir opcionalmente, un estudio de monitorización ligero que usa menos de 50 ubicaciones de fuentes y sensores, o menos de 20 ubicaciones de fuentes y sensores, o menos de 10 ubicaciones de fuentes y sensores, o solo una ubicación de fuente y solo una ubicación de sensor para el área. En una aplicación, una fuente en la ubicación de la fuente genera solo una frecuencia única para todo el estudio de monitorización ligero. En otra aplicación, una fuente en la ubicación de la fuente genera un conjunto de monofrecuencias en forma de martilleo, para todo el estudio de monitorización ligero. El método también puede incluir una etapa de realizar un estudio de monitorización ligero adicional, menos de una semana después del estudio de monitorización ligero y/o una monitorización continua.

En la Figura 13 se ilustra un ejemplo de un dispositivo informático representativo capaz de realizar operaciones de acuerdo con las realizaciones de ejemplo discutidas anteriormente. Se puede usar hardware, firmware, software o una combinación de los mismos para realizar las diversas etapas y operaciones descritas en el presente documento.

El dispositivo de ordenador 1300 de ejemplo adecuado para realizar las actividades descritas en las realizaciones de ejemplo puede incluir un servidor 1301. Un servidor 1301 de este tipo puede incluir una unidad de procesador central (CPU) 1302 acoplada a una memoria de acceso aleatorio (RAM) 1304 y a una memoria de solo lectura (ROM) 1306. La ROM 1306 también puede ser otro tipo de medio de almacenamiento para almacenar programas, tal como ROM programable (PROM), PROM borrable (EPROM), etc. El procesador 1302 puede comunicarse con otros componentes internos y externos a través de circuitos de entrada/salida (E/S) 1308 y bus 1310 para proporcionar señales de control y similares. El procesador 1302 realiza una variedad de funciones conocidas en la técnica, según lo dictan las instrucciones de software y/o firmware.

El servidor 1301 también puede incluir uno o más dispositivos de almacenamiento de datos, incluyendo unidades de disco duro 1312, unidades de CD-ROM 1314 y otro hardware capaz de leer y/o almacenar información tal como un DVD, etc. Todas las etapas descritas anteriormente pueden almacenarse y distribuirse en un CD-ROM o DVD 1316, medio extraíble 1318 u otra forma de medio capaz de almacenar información de forma portátil. Estos medios de almacenamiento pueden insertarse y leerse en dispositivos tales como la unidad de CD-ROM 1314, la unidad 1312, etc. El servidor 1301 puede acoplarse a una pantalla 1320, que puede ser cualquier tipo de pantalla de presentación conocida, tal como pantallas LCD o LED, pantallas de plasma, tubos de rayos catódicos (CRT), etc. Se proporciona una interfaz de entrada de usuario 1322, que incluye uno o más mecanismos de interfaz de usuario, tal como un ratón, teclado, micrófono, panel táctil, pantalla táctil, sistema de reconocimiento de voz, etc.

El servidor 1301 se puede acoplar a otros dispositivos informáticos a través de una red. El servidor puede ser parte de una configuración de red más grande como en una red de área global (GAN) tal como Internet 1328.

Como también apreciará un experto en la técnica, las realizaciones de ejemplo pueden realizarse en un dispositivo de comunicación inalámbrica, una red de telecomunicaciones, como un método o en un producto de programa informático. Por consiguiente, las realizaciones de ejemplo pueden adoptar la forma de una realización completamente de hardware o una realización que combine aspectos de hardware y software. Además, las realizaciones de ejemplo pueden adoptar la forma de un producto de programa informático almacenado en un medio de almacenamiento legible por ordenador que tiene instrucciones legibles por ordenador incorporadas en el medio. Puede utilizarse cualquier

medio legible por ordenador, incluyendo discos duros, CD-ROM, discos versátiles digitales (DVD), dispositivos de almacenamiento óptico o dispositivos de almacenamiento magnéticos, tales como disquetes o cintas magnéticas. Otros ejemplos no limitativos de medios legibles por ordenador incluyen memorias de tipo flash u otros tipos conocidos de memorias.

Las realizaciones ejemplares divulgadas proporcionan un aparato y un método para monitorizar rápida y eficientemente un depósito subterráneo durante un estudio en 4D. Debe entenderse que esta descripción no pretende limitar la invención. Por el contrario, los ejemplos de realización están destinados a cubrir alternativas y modificaciones. El alcance de la invención se define por las reivindicaciones adjuntas. Además, en la descripción detallada de las realizaciones de ejemplo, se exponen numerosos detalles específicos para proporcionar un completo entendimiento de la invención reivindicada. Sin embargo, un experto en la técnica comprenderá que se pueden poner en práctica varias realizaciones sin tales detalles específicos.

REIVINDICACIONES

1. Un método implementado por ordenador para monitorizar un subsuelo durante un estudio en 4 dimensiones (4D), comprendiendo el método:

obtener (1204) un estudio completo de un área del subsuelo que necesita ser monitorizada;

identificar (1206) ubicaciones de receptor y de fuente para el área y frecuencias de fuente que se emitirán en el área durante estudios ligeros basados en la desmigración o el trazado de rayos inverso del estudio completo;

realizar (1212) o recibir datos sísmicos de un estudio de base ligero para el área en base a las ubicaciones identificadas del receptor y de la fuente para el área y frecuencias de fuente que se emitirán en el área en base a la desmigración o el rastreo de rayos inversos; realizar (1208) o recibir datos sísmicos de un estudio de monitorización ligero para el área basado en el mismo receptor identificado y ubicaciones de fuentes para el área y frecuencias de fuente que se emitirán en el área en base a la desmigración o el trazado de rayos inverso como para realizar el estudio de base ligero; y

generar (1210) una imagen del área basada en una comparación de (i) el estudio de base ligero y (ii) el estudio de monitorización ligero para el área;

en el que cualquiera de los estudios ligeros proporciona sustancialmente menos datos que los obtenidos durante el estudio completo.

2. El método de la reivindicación 1,

en el que el estudio completo usa más de 100 ubicaciones de fuentes y sensores, mientras que los estudios de monitorización ligero y de base ligero usan menos de 100 ubicaciones de fuentes y sensores, y el estudio de monitorización ligero se realiza más tarde que el estudio de base ligero.

3. El método de la reivindicación 1, en el que el estudio de monitorización ligero o de base ligero usa menos de 50 ubicaciones de fuentes y sensores.

4. El método de la reivindicación 1, en el que el estudio de monitorización ligero o el estudio de base ligero usa menos de 20 ubicaciones de fuentes y sensores.

5. El método de la reivindicación 1, en el que el estudio de monitorización ligero o de base ligero usa menos de 10 ubicaciones de fuentes y sensores.

6. El método de la reivindicación 1, en el que el estudio de monitorización ligero o de base ligero usa solo una ubicación de fuente y solo una ubicación de sensor para el área.

7. El método de la reivindicación 6, en el que una fuente en la ubicación de fuente genera solo una frecuencia única para todo el estudio de monitorización ligero o de base ligero.

8. El método de la reivindicación 6, en el que una fuente en la ubicación de fuente genera varias monofrecuencias para todo el estudio de monitorización ligero.

9. El método de la reivindicación 1, en el que una fuente en una ubicación de fuente del estudio de monitorización ligero o de base ligero genera varias monofrecuencias para todo el estudio de monitorización ligero.

10. El método de la reivindicación 1, que comprende, además:

realizar un estudio de monitorización ligero adicional, menos de una semana después del estudio de monitorización ligero o una monitorización continua.

11. Un dispositivo informático (1300) para monitorizar un subsuelo durante un estudio en 4 dimensiones (4D), comprendiendo el dispositivo informático:

una interfaz (1308) configurada para recibir (1204) un estudio completo de un área del subsuelo que necesita ser monitorizada;

un procesador (1302) conectado a la interfaz y configurado para identificar (1206) ubicaciones de fuente y receptor para el área y frecuencias de fuente que se emitirán en el área durante estudios ligeros basados en la desmigración o el trazado de rayos inverso del estudio completo;

obtener (1212) datos sísmicos asociados con un estudio de base ligero para el área en base a las ubicaciones de receptores y fuentes identificadas para el área y las frecuencias de fuente que se emitirán en el área en base a la desmigración o el trazado de rayos inverso;

obtener (1208) datos sísmicos asociados con un estudio de monitorización ligero para el área basado en las

mismas ubicaciones de receptores y fuentes identificadas para el área y frecuencias de fuente que se emitirán en el área en base a la desmigración o el trazado de rayos inverso como para realizar el estudio de base ligero; y

generar (1210) una imagen del área basada en una comparación de (i) los datos sísmicos del estudio de base ligero para el área y (ii) los datos sísmicos del estudio de monitorización ligero para el área;

en el que cualquiera de los estudios ligeros proporciona sustancialmente menos datos que los obtenidos durante el estudio completo.

12. El dispositivo informático de la reivindicación 11,

en el que el estudio de base completo usa más de 100 ubicaciones de fuentes y sensores, mientras que el estudio de monitorización ligero o de base ligero usa menos de 100 ubicaciones de fuentes y sensores, y el estudio de monitorización ligero se realiza más tarde que el estudio de base ligero.

13. El dispositivo informático de la reivindicación 11, en el que el estudio de monitorización ligero o de base ligero usa menos de 20 ubicaciones de fuentes y sensores.

14. El dispositivo informático de la reivindicación 11, en el que el estudio de monitorización ligero o de base ligero usa menos de 10 ubicaciones de fuentes y sensores.

15. El dispositivo informático de la reivindicación 11, en el que el estudio de monitorización ligero o de base ligero usa solo una ubicación de fuente y solo una ubicación de sensor para el área.

FIG. 1
(Antecedentes de la técnica)

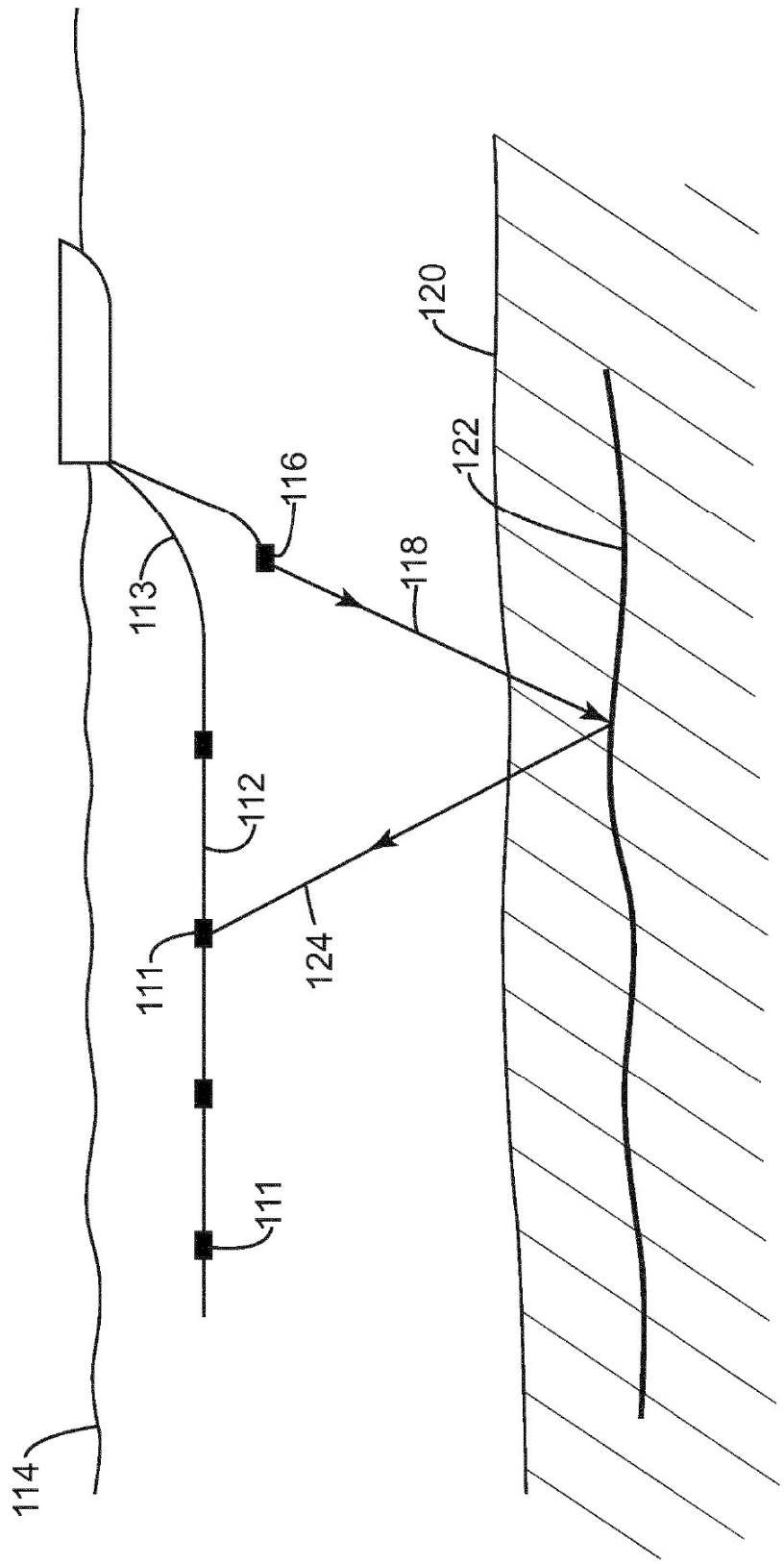


FIG. 2
(Antecedentes de la técnica)

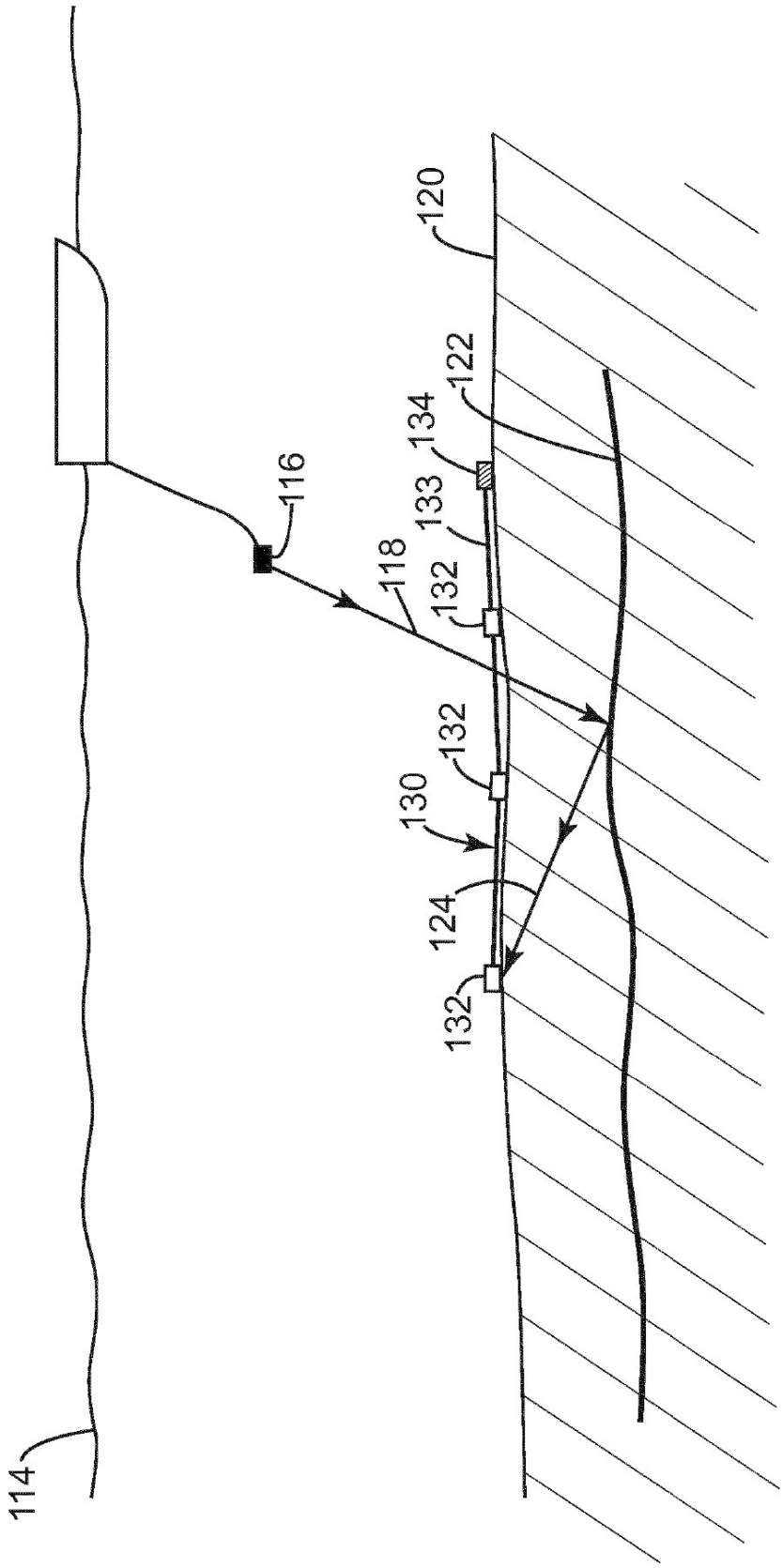


FIG. 3

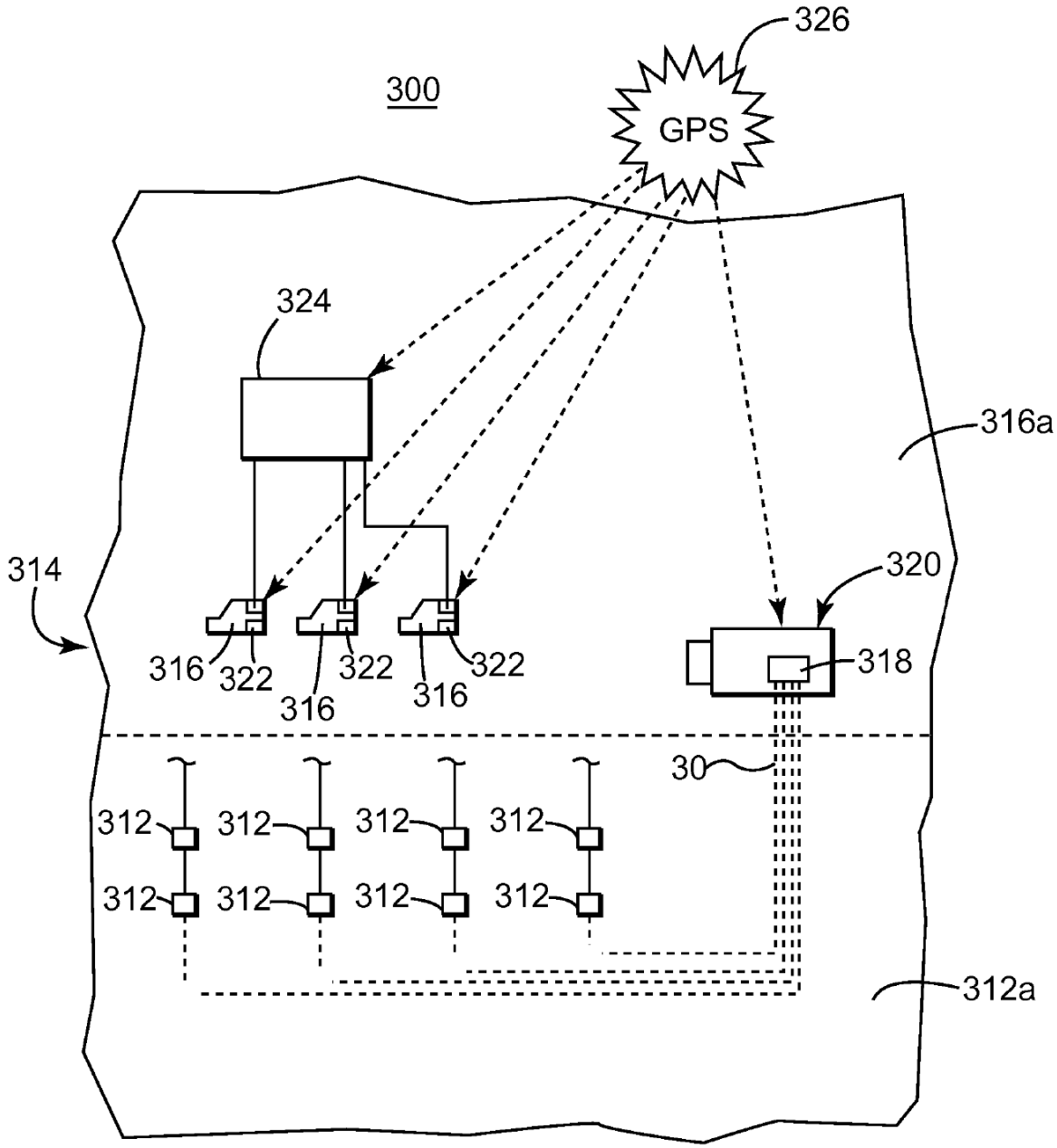

326
300
GPS
324
316a
314
320
316
322
322
322
316
316
318
30
312
312
312
312
312
312
312
312
312a

FIG. 4A

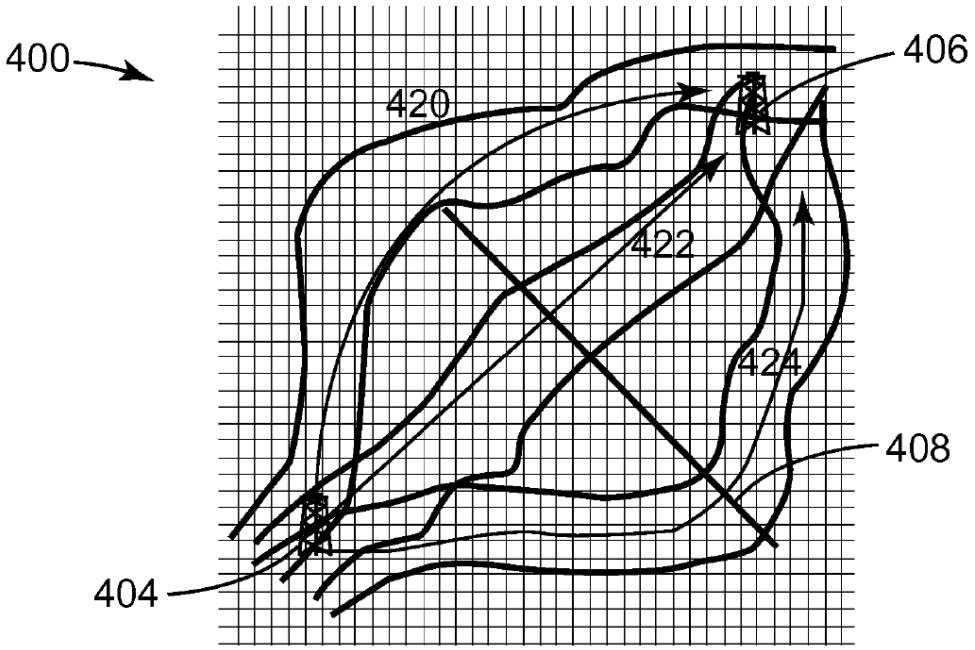


FIG. 4B

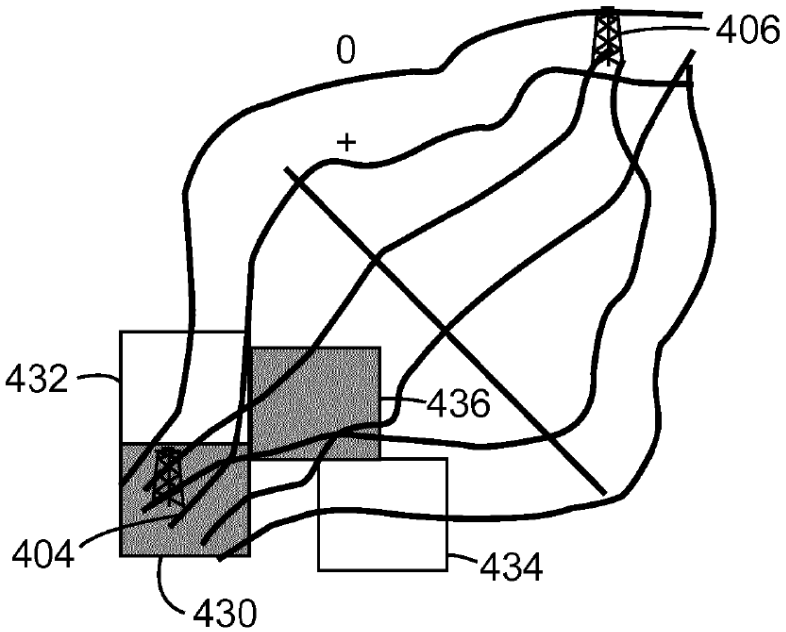


FIG. 5A

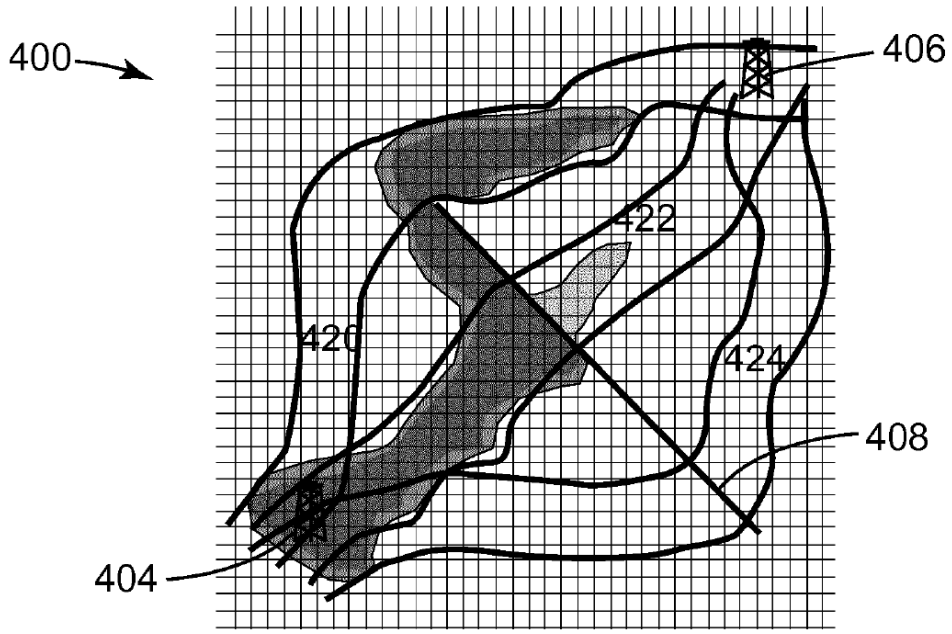


FIG. 5B

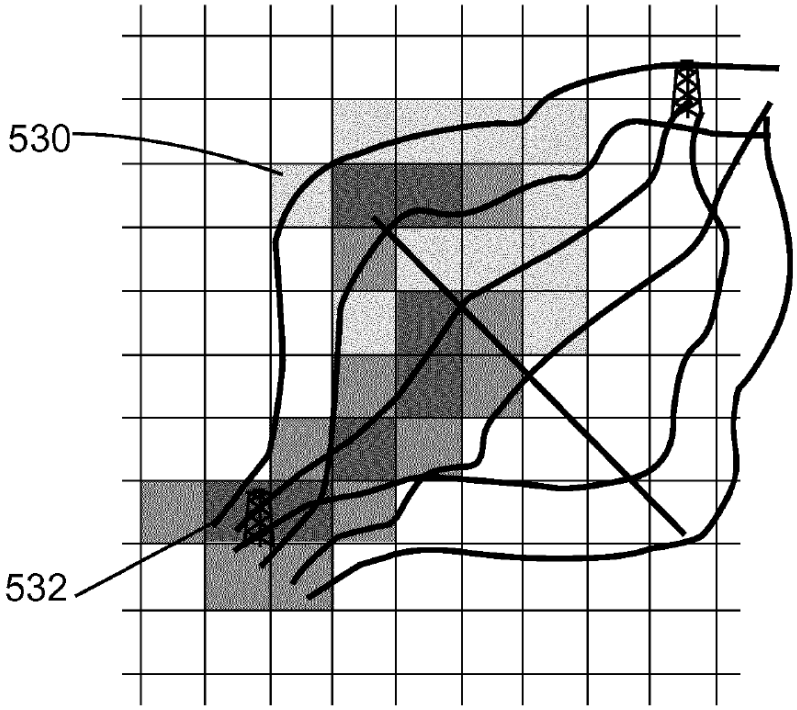


FIG. 6A

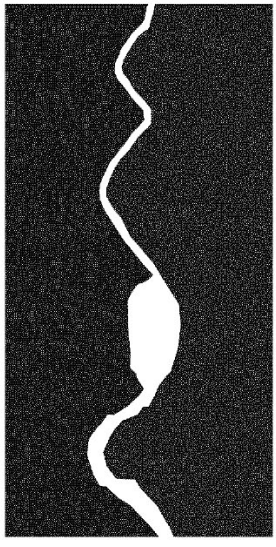


FIG. 6B

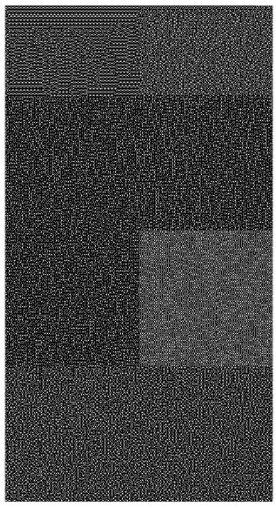


FIG. 7A

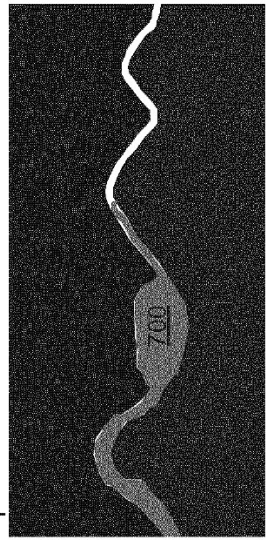


FIG. 7B

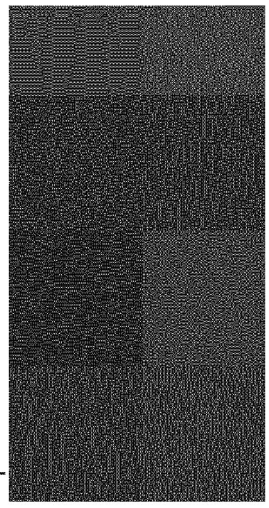


FIG. 8

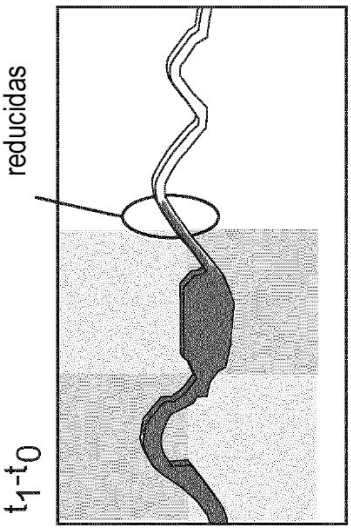


FIG. 9A

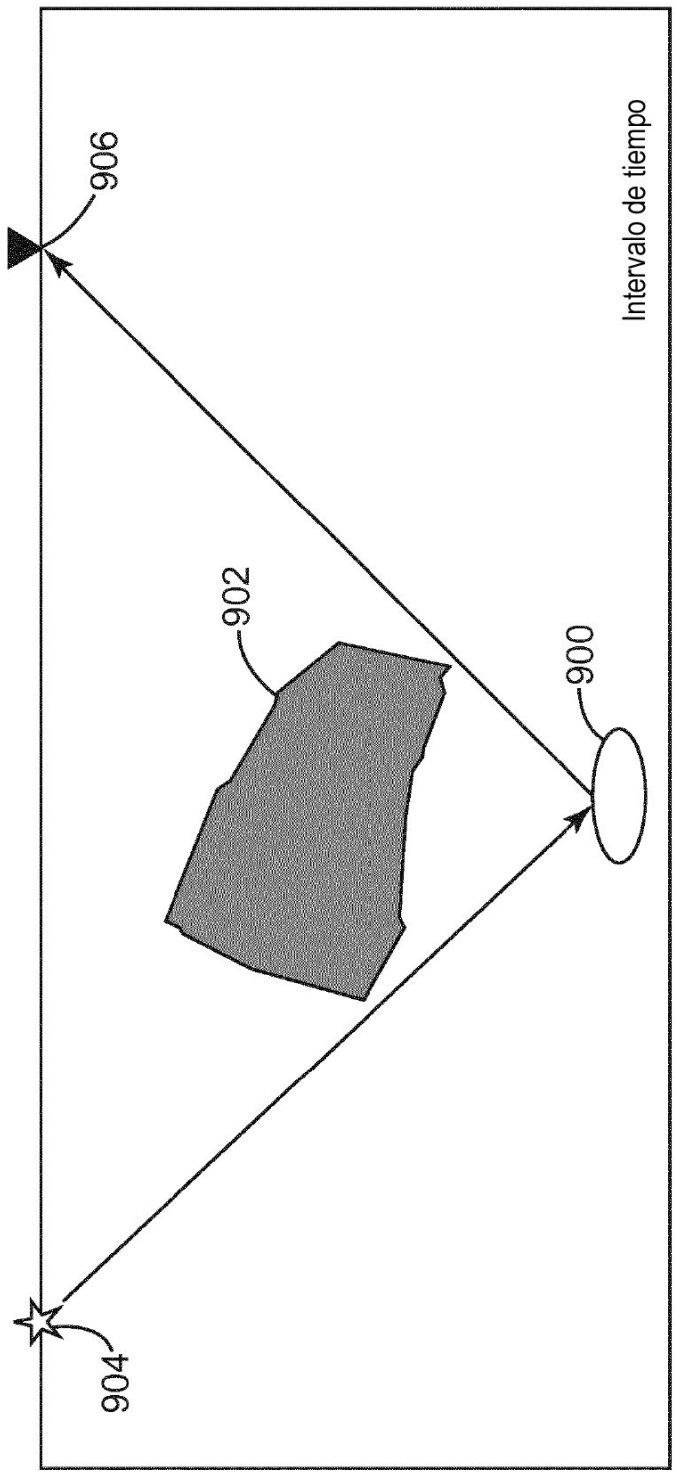

906
Intervalo de tiempo
902
900
904

FIG. 9B

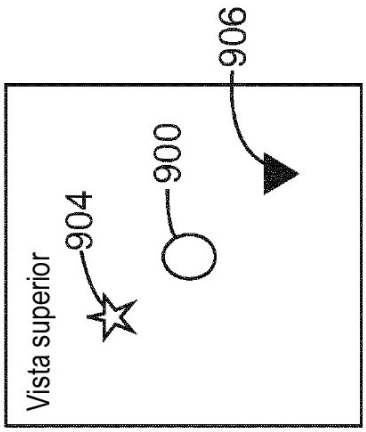
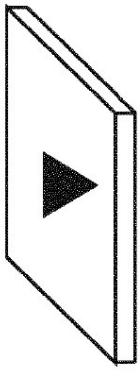
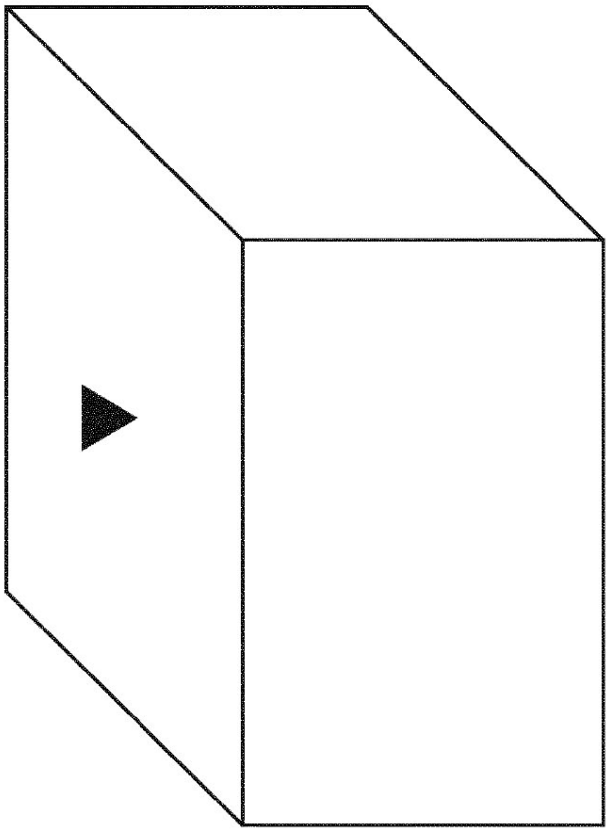

Vista superior
904
900
906

FIG. 10A



Resolución vóxel sísmico convencional

FIG. 10B



Nueva resolución vóxel sísmico de ejemplo de monofrecuencia

FIG. 11

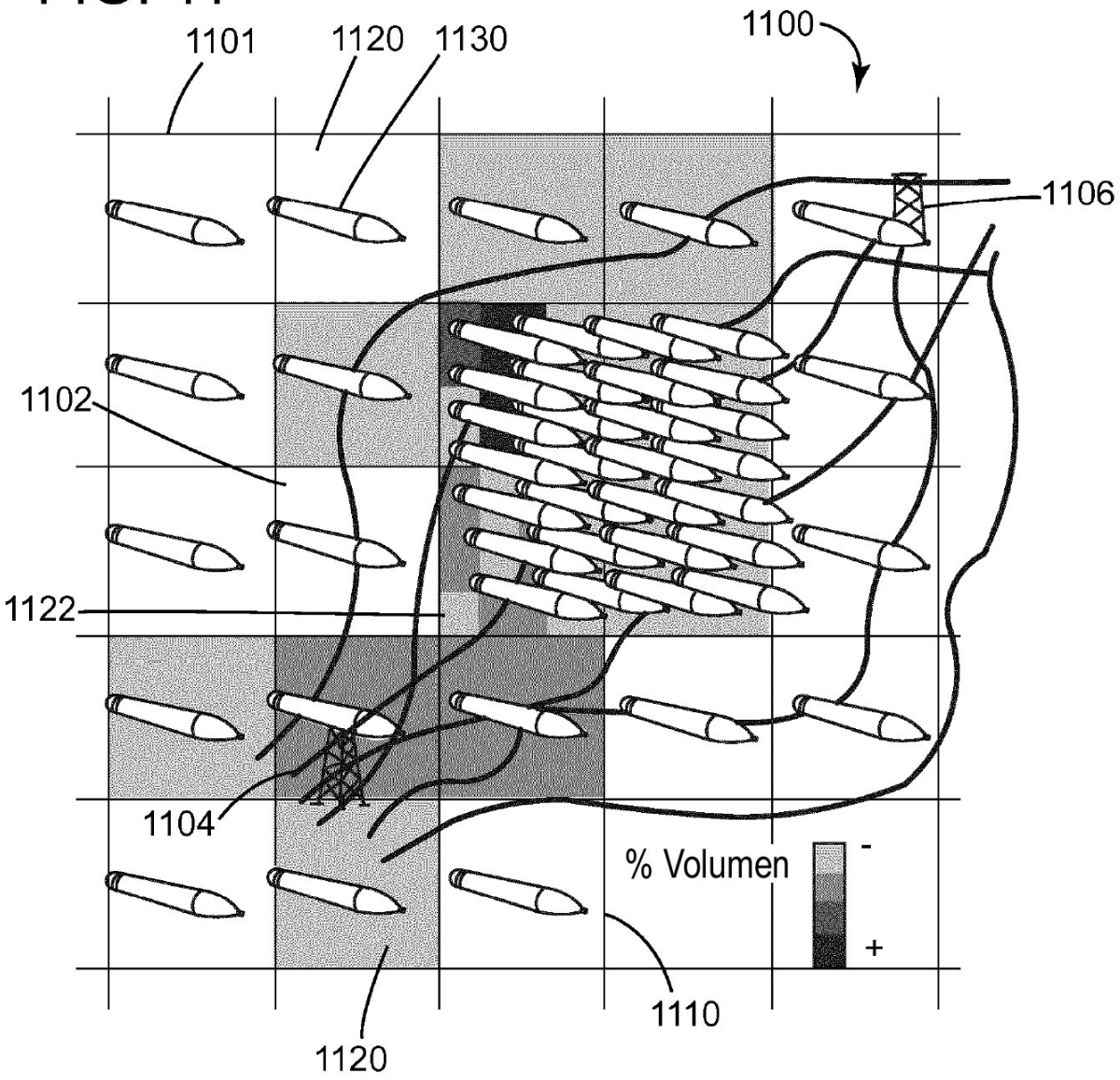


FIG. 12

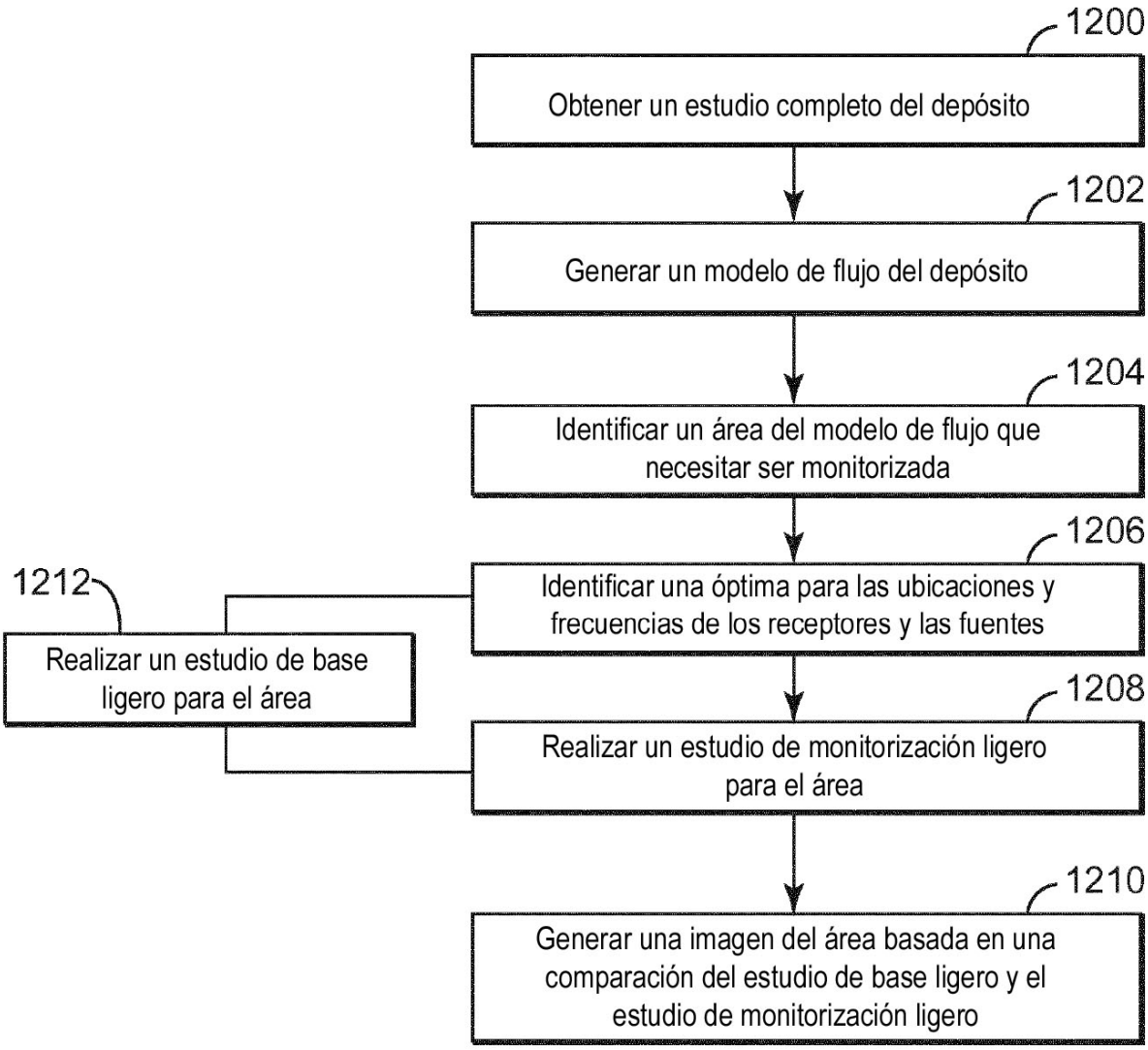
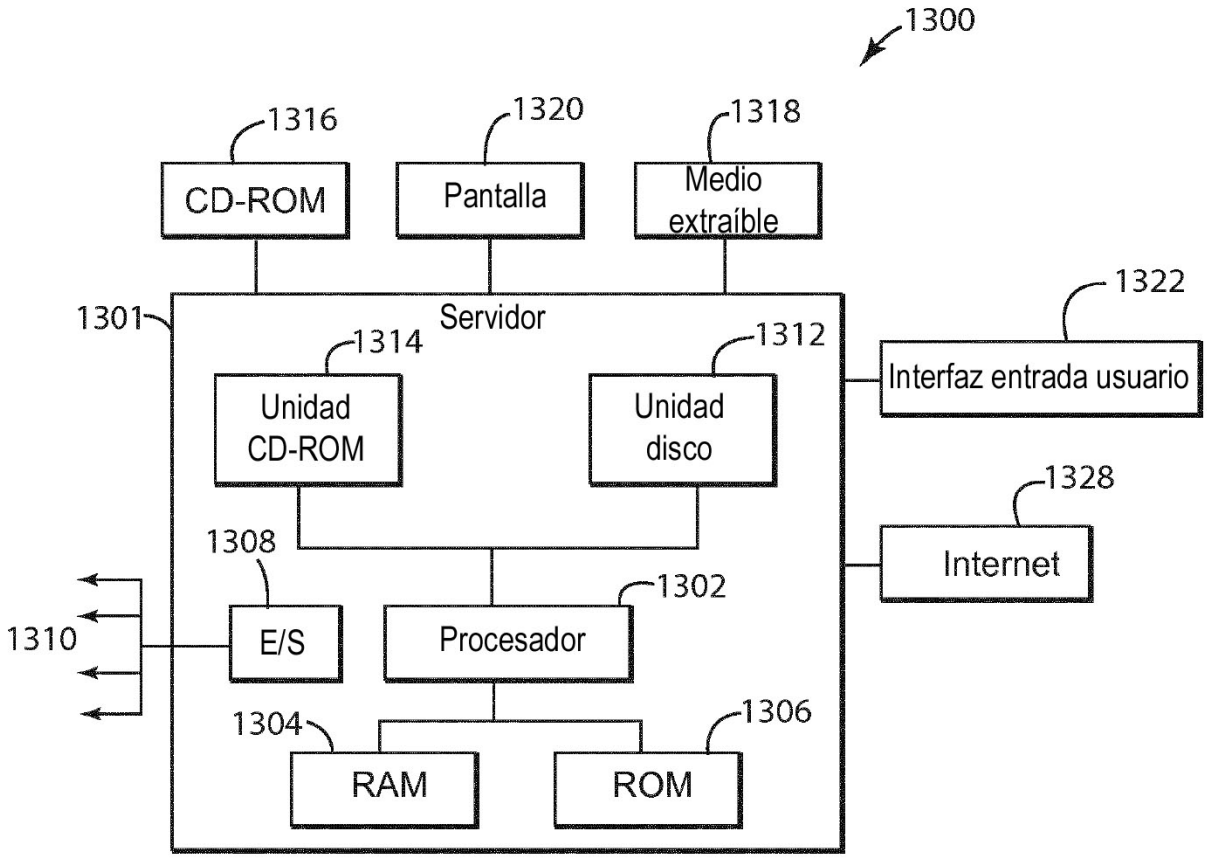

1200
Obtener un estudio completo del depósito
1202
Generar un modelo de flujo del depósito
1204
Identificar un área del modelo de flujo que necesitar ser monitorizada
1206
Identificar una óptima para las ubicaciones y frecuencias de los receptores y las fuentes
1212
Realizar un estudio de base ligero para el área
1208
Realizar un estudio de monitorización ligero para el área
1210
Generar una imagen del área basada en una comparación del estudio de base ligero y el estudio de monitorización ligero

FIG. 13


1300
1316
CD-ROM
1320
Pantalla
1318
Medio extraíble
1301
Servidor
1314
Unidad CD-ROM
1312
Unidad disco
1322
Interfaz entrada usuario
1328
Internet
1308
E/S
1310
1302
Procesador
1304
RAM
1306
ROM