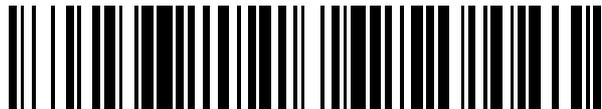


19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 629 684**

51 Int. Cl.:

G01V 1/28

(2006.01)

12

TRADUCCIÓN DE PATENTE EUROPEA

T3

86 Fecha de presentación y número de la solicitud internacional: **29.06.2012 PCT/CZ2012/000058**

87 Fecha y número de publicación internacional: **03.01.2014 WO14000718**

96 Fecha de presentación y número de la solicitud europea: **29.06.2012 E 12745617 (6)**

97 Fecha y número de publicación de la concesión europea: **17.05.2017 EP 2834672**

54 Título: **Método que discrimina entre sismicidad natural e inducida**

45 Fecha de publicación y mención en BOPI de la traducción de la patente:
14.08.2017

73 Titular/es:

SEISMIK S.R.O. (50.0%)

Kubisova 1265/8

18200 Praha 8, Liberi, CZ y

**ÚSTAV STRUKTURY A MECHANIKY HORNIN AV
CR, V.V.I. (50.0%)**

72 Inventor/es:

EISNER, LEO y

OPRSAL, IVO

74 Agente/Representante:

LINAGE GONZÁLEZ, Rafael

ES 2 629 684 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 que discrimina entre sismicidad natural e inducida

5 Campo de la invención

La invención se refiere de manera general al campo de la sismicidad. Particularmente, se refiere a la vigilancia sísmica útil en la industria de la minería o la industria de extracción de petróleo y gas. También tiene aplicaciones en la prospección sísmica para detectar depósitos de agua subterránea así como el problema mundial de secuestro del CO₂. Específicamente, la presente invención se refiere al método que proporciona criterios objetivos para determinar la asociación temporal de sismicidad y diversos tipos de actividad humana, particularmente asociados con la industria de la minería.

15 Antecedentes de la invención

Es un hecho constatado que la inyección o retirada de fluido de una formación rocosa puede inducir o desencadenar actividad sísmica. Sin embargo, también se produce sismicidad natural en regiones en las que se emplazan los centros de producción. Los métodos usados actualmente y el procesamiento de los datos asociados conducen a la obtención de una correlación estadísticamente significativa incluso para datos independientes (aleatorios) que indican una relación causal de manera incorrecta cuando no está presente ninguna relación.

Probar o refutar una relación causal entre sismicidad y actividad humana es difícil. Uno de los aspectos clave de probar una relación causal son las relaciones temporales, en las que la actividad humana precede a la sismicidad y el aumento de la actividad humana provoca un aumento de la sismicidad. Puede usarse tal relación por empresas explotadoras, las autoridades o aseguradoras para tomar las medidas adecuadas. La sismicidad, relacionada posiblemente con el tratamiento de pozos de producción, puede representar una amenaza para los hogares y las infraestructuras con un impacto social relativamente importante.

Se ha observado una correlación cualitativa entre sismicidad y volúmenes de inyección en muchos casos bien documentados de sismicidad desencadenada o inducida por la inyección de fluido de manera profunda (Healy *et al*, 1968). Recientemente, Horton (Horton 2012) ha usado valores directos de correlación cruzada normalizada. La desventaja de tal enfoque es que dos series temporales con medias distintas de cero positivas presentan altos valores de correlación cruzada para un retardo distinto de cero con un límite igual a 1 para valores de media grande y baja desviación estándar. Tal enfoque no indica la relación causal entre las dos series temporales.

Se requiere enormemente en el sector industrial un método que permita proporcionar una determinación objetiva de si la actividad sísmica (sismicidad) que se produce en un área determinada se induce o desencadena por actividad industrial de minería/extracción o si la sismicidad se produce de manera natural. Los presentes inventores han propuesto recientemente (Opsal y Eisner, 2012) usar una "función útil" eliminando la media móvil. Sin embargo, la presente invención da a conocer una mejora significativa del método que se basa en la eliminación de la media móvil y otros ajustes.

Sumario de la invención

Los inventores de la presente invención descubrieron cómo obtener criterios objetivos para tomar una decisión cuando se determina si la actividad sísmica (sismicidad) que se produce en un área determinada se induce (o desencadena) por la actividad humana (por ejemplo, tratamiento geofísico) asociada particularmente con la industria de la minería/extracción, tal como inyección o producción de fluidos tales como salmuera o inyección de gas, o si la sismicidad registrada se produce de manera natural. En el presente documento, el término sismicidad "inducida" también implica el término sismicidad "desencadenada".

La esencia del método de la invención reside en proporcionar criterios objetivos para determinar la asociación temporal de sismicidad y actividad humana. El resultado viene dado por la respuesta lógica SÍ/NO a la pregunta "¿son estadísticamente independientes la sismicidad y la actividad humana?" La respuesta no es obvia ni siquiera en el caso de una gran cantidad de datos diversos adquiridos durante el tratamiento (véase a continuación), y la bibliografía científica actualizada no proporciona una respuesta clara a tal pregunta y la. La inyección en un pozo no es el único caso de aplicación. Generalmente, cualquier actividad subterránea tal como minería, minería a cielo abierto, producción de gas o incluso una natural, tal como el relleno de sumideros de agua dulce puede inducir actividad sísmica. El método, según la presente invención, permite distinguir si la sismicidad está relacionada temporalmente con actividad técnica humana (por ejemplo, tratamiento de inyección) o con cualquier proceso natural. Se basa en analizar la medida de sismicidad de la actividad humana (por ejemplo, datos de tratamiento de pozos) y en el procesamiento de datos adicional.

Recientemente, los inventores han propuesto (Opsal y Eisner, 2012) una simple mejora metodológica usando un tratamiento específico de los datos antes de que se aplique una correlación cruzada con resultados no aplicables de manera fiable (es decir, eliminación de la media móvil). El nuevo método de adquisición y procesamiento de datos

descrito en la presente solicitud permite un resultado estadísticamente significativo (por tanto, fiable) como base para la toma de decisiones.

5 El método requiere una adquisición de datos sísmicos mediante un sistema de vigilancia, y procesar los datos adquiridos. La adquisición de datos consiste en una red de vigilancia sísmica, que se distribuye en la superficie o capa subsuperficial y registra de manera continua datos sísmicos. A partir de estos registros, se detectan eventos sísmicos y, a través de un proceso de localización de terremotos, pueden localizarse y puede determinarse su tamaño (magnitud).

10 En esta invención, el término "sismicidad" significa eventos sísmicos detectados de un área determinada (o bien localizados o bien no localizados). Se usa esta sismicidad junto con cierta medida de la actividad humana (por ejemplo, tasa de inyección, presión de fluidos inyectados, etc.) para procesar en dos sectores combinados. Cada uno de los sectores (divididos después de la adquisición de datos de actividad humana y de sismicidad) puede usarse independientemente y puede conducir a la decisión de si la sismicidad coherente temporal está relacionada estadísticamente con o es independiente de las actividades humanas.

15 En un área en la que se produce una inyección, determinar la relación entre la actividad humana, por ejemplo tratamiento geofísico (cuantificado mediante la tasa de inyección, por ejemplo) y la sismicidad a través de correlación cruzada se usa como herramienta para investigar la posibilidad de inducción de sismicidad. Los volúmenes de inyección, así como la sismicidad (recuento de eventos) son ambas funciones positivas. Aunque la correlación cruzada directa de tales funciones no indica una relación entre dos fenómenos (proporcionando altos valores de correlación cruzada incluso para funciones aleatorias positivas), más bien, se usa la correlación cruzada de sus "funciones de tiempo eficaces" (por ejemplo, funciones originales con la parte filtrada ponderada restada). Los valores de correlación cruzada normalizada (NCC) para "funciones de tiempo eficaces" (ETF) pueden presentar un máximo a 0,5 y -0,5 de manera estadísticamente no significativa para fenómenos no relacionados (es decir, sismicidad no inducida), mientras que si hay máximos positivos por encima de 0,5 indica relación temporal estadísticamente significativa entre sismicidad y actividad humana (tratamiento de inyección).

20 El término "función de tiempo" significa cualquier historial temporal discreto medido y registrado tal como volúmenes de inyección (relacionados con la inyección), presión en la boca del pozo, precipitación, aparición geofísica sísmica o cosísmica de elección limitada tal como el número de eventos sísmicos con magnitud mayor o menor que una magnitud dada (mecanismo, disminución de esfuerzos o cualquier otro parámetro) en un volumen dado (distancia, intervalo de distancia, intervalo de profundidad o cualquier otra medida); inclinación, gasto de un manantial, campo geoelectrico, presión intersticial, etc. La función de tiempo es una representación discreta digitalizada (con muestreo normalmente regular) de valor originalmente continuo como función de tiempo.

30 El término "correlación cruzada" se usa para un parámetro calculado que evalúa la similitud entre las funciones de tiempo, la correlación cruzada normalizada tiene un valor máximo de entre -1 y 1.

40 Una herramienta muy eficaz para calcular una función de correlación cruzada normalizada (NCC) puede encontrarse preferiblemente, por ejemplo, en Signal Processing Toolbox (conjunto de herramientas de procesamiento de señales) de MATLAB (MathWorks, Natick, Massachusetts, EE.UU.) "xcorr(A,B,'coeff')". Para usar la función "xcorr" de MATLAB para calcular NCC, las señales discretas de entrada de función se normalizan de manera interna para tener autocorrelaciones a un retardo cero iguales a 1,0. Las funciones de tiempo tienen que ser de la misma longitud, o la que tiene una parte distinta de cero más corta se rellena con ceros para cumplir con el intervalo, en la que la más grande es distinta de cero. "xcorr" es diferente del "corr" de Statistics Toolbox de MATLAB que calcula la correlación. Puede realizarse la correlación cruzada para señales analíticas complejas (donde la parte real es la señal, la parte imaginaria es la transformada de Hilbert de la señal). La NCC resultante es una función compleja cuyo valor absoluto puede tomarse como una medida de correlación temporal. El uso de la implementación de otra técnica de correlación cruzada (tal como "corr" de MATLAB, a partir de la definición de coeficientes de correlación de señales discretas, etc.) no tiene ninguna influencia sobre el método presentado. Sin embargo, algunas de las implementaciones usadas pueden diferir en cuanto a la función de NCC resultante.

55 El método según la presente invención comprende algunas o todas de las siguientes etapas:

- se miden datos sísmicos como movimiento del terreno provocado por fuentes de terremotos mediante al menos un sensor en la superficie o bajo tierra,

60 - el procesamiento de los datos sísmicos permite detectar microeventos sísmicos, en particular detectar su momento y tamaño (magnitud),

- obtener la primera función de tiempo (por ejemplo, el número de terremotos por encima de determinada magnitud al día en un área alrededor del pozo de inyección) a partir de la sismicidad obtenida previamente mediante el procesamiento de los datos, lo que da como resultado parámetros de origen de terremoto (ubicación, hora de inicio, es decir, la hora en que se produjo el evento, magnitud, etc.),

- obtener la segunda función de tiempo (por ejemplo, tasa de inyección) a partir de datos obtenidos previamente de actividad humana, por ejemplo datos de tratamiento geofísico, tales como presión en la boca del pozo, volúmenes de inyección, volumen extraído en minería de actividad técnica humana que puede inducir posiblemente la sismicidad,

5 - realizar la correlación cruzada de funciones de tiempo (TF), es decir la primera función de tiempo y la segunda función de tiempo, para obtener una correlación cruzada normalizada (NCC_{TF}) y normalizar el resultado con un coeficiente de normalización especial (es decir, NCC esperada teóricamente, NCC_{TE}) derivado de las propias funciones de tiempo para obtener una correlación cruzada recién normalizada de nuevo (RNCC),

10 - alternativamente (o adicionalmente, véase más adelante) aplicar una transformación matemática a la primera función de tiempo y a la segunda función de tiempo para potenciar variaciones temporales significativas para obtener funciones de tiempo eficaces (ETF), es decir la primera función de tiempo eficaz y la segunda función de tiempo eficaz, donde las funciones de tiempo pueden transformarse de varios modos posibles,

15 - realizar la correlación cruzada de la primera función de tiempo eficaz y la segunda función de tiempo eficaz y obtener una correlación cruzada normalizada (NCC_{ETF}) que discrimina entre la semejanza temporal de funciones de tiempo eficaces,

20 - estimar si la correlación cruzada obtenida anteriormente (NCC_{ETF} o RNCC) tiene un máximo a un valor significativamente alto con un pequeño retardo temporal entre las dos funciones de tiempo (es decir, la primera función de tiempo eficaz y la segunda función de tiempo eficaz o la primera función de tiempo y la segunda función de tiempo), lo que es indicativo de que ambas están relacionadas. Además, puede combinarse el modo basado en la relación de correlación cruzada de funciones de tiempo (lo que da como resultado RNCC) con el modo basado en la relación de correlación cruzada de funciones de tiempo eficaces (lo que da como resultado NCC_{ETF}) en el modo en el que se evalúan ambas correlaciones cruzadas y se usan para evaluar la probabilidad de sismicidad inducida. Esta combinación potencia la capacidad de predicción del método.

30 El modo preferido para obtener ETF es transformar TF al dominio espectral de Fourier mediante transformada de Fourier discreta (véase, por ejemplo, el documento WO 2001/059481), multiplicando la parte real e imaginaria de la misma por una función de filtrado (FF) y transformar el resultado de vuelta al dominio de tiempo para obtener ETF. Para algunos casos específicos, puede crearse ETF restando el valor medio de una función. Esto se conoce como la prueba de Pearson. Algunos otros ejemplos de otras construcciones de ETF son:

35 - Filtrado con filtro paso alto, paso bajo o paso banda de una señal en el dominio de Fourier mediante un filtro arbitrario.

- Filtrado con filtro paso bajo de una señal en el dominio de tiempo restando el promedio de ventana móvil. El intervalo de tiempo de ventana depende del tiempo y puede ponderarse dependiendo la ponderación del tiempo.

40 La geometría de red para medir los datos sísmicos debe diseñarse para cumplir con el manual IASPEI de demandas prácticas de observatorios. Los parámetros básicos de una red de este tipo son la distancia entre receptores en la red de vigilancia y la geometría. Pueden usarse datos de estaciones regionales presentes.

45 Un experto en la técnica entenderá que pueden realizarse diversas modificaciones en la invención sin apartarse del alcance de la invención según se describe en este texto y se expone en las reivindicaciones 1-3 adjuntas.

Breve descripción de los dibujos

50 La presente invención se describirá adicionalmente, a modo de ejemplo, con referencias a los siguientes dibujos.

Figura 1: Correlación cruzada normalizada de dos funciones aleatorias, que representan el número de terremotos como datos semanales por encima de la magnitud 2 a la semana. La media normalizada y las variaciones estándar disminuyen debido a la suma de intervalos semanales. El valor de meseta de correlación cruzada es tal como se muestra en la ecuación 2.

Figura 2: Correlación cruzada de Pearson de datos semanales tal como se presenta en la figura 1. Los valores medios de las partes no rellenas con ceros se restan antes del cálculo de la correlación normalizada. Para series más largas o más realizaciones (en cuanto al promedio), la correlación tiene como límite 0 para variables independientes.

Figura 3: NCC_{ETF} (panel inferior) para "funciones de tiempo eficaces" (ETF) del número de terremotos mayores que la magnitud dada al mes en la inyección de residuos del arsenal de las Montañas Rocosas (panel superior), y volumen inyectado al mes (panel inferior) (datos para ETF tomados de Healy *et al*, 1968). Se crean ETF filtrando en el dominio de frecuencia con un filtro $= (1-0,85*\text{Sinc}(f))$, donde $f=4,8*(1e-8)$ Hz.

Figura 4: RNCC (panel inferior) para funciones de tiempo originales: Número de terremotos en la inyección de residuos del arsenal de las Montañas Rocosas (panel superior), y volumen inyectado (panel inferior) (datos de dos paneles superiores tomados de Healy *et al*, 1968).

5 Figura 5: Diagrama de flujo que describe el método desde la adquisición de datos hasta la decisión sobre la correlación estadísticamente significativa entre actividad geofísica y sismicidad relacionada. Los dos posibles procesos, que pueden tomarse independientemente, funcionan con A: Datos originales (panel izquierdo), y B: Datos filtrados, respectivamente. A: Realiza la NCC con datos originales y los normaliza con respecto a RNCC para dar funciones de tiempo. B: Se basa en filtrar los datos para dar funciones de tiempo eficaces y realizar la estimación de NCC, lo que da como resultado NCC_{ETF} .

Descripción detallada de la invención

15 El siguiente ejemplo proporciona realización/realizaciones a modo de ejemplo y no pretende limitar el alcance, la aplicabilidad o configuración de la invención.

1. CONSIDERACIONES TEÓRICAS

20 Va a investigarse la correlación cruzada normalizada de funciones de tiempo A y B con medias distintas de cero.

$$A = N_A + \mu_A, B = N_B + \mu_B$$

donde: N_A es una función de media cero, μ_A es la media de A y la desviación estándar relativa se lee como

25 $E(N_A^2) = \sigma_A^2, E(N_A) = 0$

E(X) es el valor esperado de X. (Los valore de B y valores indexados de B se aplican de manera análoga). Existen muchas definiciones de correlación cruzada. La correlación cruzada normalizada (como en Signal Processing Toolbox de MATLAB, o “correlación de reflexión”, Wikipedia), NCC, se lee como

30
$$\begin{aligned} Corr_n(A, B) &= \frac{E(AB)}{\sqrt{E(A^2)E(B^2)}} = \frac{E((N_A + \mu_A)(N_B + \mu_B))}{\sqrt{E((N_A + \mu_A)^2)E((N_B + \mu_B)^2)}} \\ &= \frac{E(N_A N_B) + \mu_A \mu_B}{\sqrt{(\sigma_A^2 + \mu_A^2)(\sigma_B^2 + \mu_B^2)}} \quad (1) \end{aligned}$$

Para funciones aleatorias independientes N_A, N_B , la correlación cruzada esperada teóricamente puede calcularse de la siguiente manera:

35
$$\frac{\mu_A \mu_B}{\sqrt{(\sigma_A^2 + \mu_A^2)(\sigma_B^2 + \mu_B^2)}} = NCC_{TE}(A, B) \quad (2)$$

Por tanto, para dos funciones con media distinta de cero cuanto menor es la desviación alrededor de esa media, mayor es la correlación cruzada (suponiendo que ambas medias son del mismo signo).

40 Así, una correlación cruzada normalizada de nuevo, RNCC, se define como:

$$RNCC(A, B) = \frac{Corr_n(A, B) - NCC_{TE}(A, B)}{1 - NCC_{TE}(A, B)}, \quad (3)$$

45 Donde el denominador normaliza de nuevo el valor máximo a 1 para funciones perfectamente correlacionadas.

Para funciones de tiempo con σ_A y σ_B relativamente pequeñas y funciones independientes N_A, N_B :

50
$$\lim_{\frac{\sigma_A \sigma_B}{\mu_A \mu_B} \rightarrow 0} \left(\frac{\mu_A \mu_B}{\sqrt{(\sigma_A^2 + \mu_A^2)(\sigma_B^2 + \mu_B^2)}} \right) = 1 \quad (4)$$

Para funciones de tiempo con $\mu_A = \mu_B = 0$:

$$Corr_{n_{medias\ cero}}(A, B) = \frac{E(N_A N_B)}{\sigma_A^2 \sigma_B^2} \quad (5)$$

5 Sólo en este caso la correlación cruzada normalizada oscila entre -1 y +1 y puede indicar relación física si es próxima a 1.

Se usó Statistics Toolbox de MATLAB (MathWorks, Natick, Massachusetts, MA 01760-2098, EE.UU.) como herramienta matemática preferida. Ha de observarse que "xcorr" es diferente de "corr" de Statistics Toolbox de MATLAB que calcula la correlación especificada en la ecuación (4). Se usa la función NCC de Signal Processing Toolbox de MATLAB "xcorr(A,B,'coeff')". Así, se aplican los respectivos σ y μ al más largo de los intervalos para ambas entradas. Las fórmulas (1, 2) y (4, 5), que proporcionan un valor de máximo (o meseta) de la correlación cruzada, son válidas en sentido de promedio de realizaciones o límite de señal infinito, que es una estimación de la realización actual de funciones independientes (véase la figura 1). El valor teórico de NCC, NCC_{TE} (ecuación 2, valor de "max_xcross(theor)" en todas las figuras) se calcula para cada señal con la suposición de series independientes ($E(AB)=0$). La figura 1 muestra una función aleatoria con medias distintas de cero, y sus NCC. La realización aleatoria de estas dos variables es exactamente igual, pero las características estadísticas de esta última se calculan incluyendo el intervalo rellenado con ceros como en MATLAB. La amplitud de meseta concuerda (en promedio) con el valor obtenido teóricamente de la correlación cruzada normalizada. Si las funciones tuvieran igual longitud, la envolvente de NCC sería triangular. En este caso, la NCC es un trapecoide con la amplitud máxima disminuida debido a la normalización. Obsérvese que se esperaba que el cambio del valor medio y la desviación estándar de la segunda representación gráfica de la señal de la figura 1 desde la parte distinta de cero fuese $\mu=1/2$ y $\sqrt{(1/12)}=0,289$ debido al relleno con ceros y la normalización. Las series de la figura 1 son valores "semanales", en los que cada uno de estos valores se crea mediante la suma de siete realizaciones aleatorias de dos funciones aleatorias positivas (valores diarios) con distribución de tipo cajón (*boxcar*) en $\langle 0,1 \rangle$ ($\mu=1/2$). Si se realiza entonces la normalización, el valor medio de sus partes distintas de cero permanecería inalterado mientras que su desviación estándar disminuiría hasta $\sqrt{(1/7 \cdot 1/12)}=0,109$ siguiendo el teorema del límite central.

2. APLICACIÓN

30 a) Procesamiento de datos originales

La primera ramificación del método que comprende las etapas 1, 2, 3A-5A y 6 (figura 5) muestra cómo tratar los datos sin procesamiento previo en el proceso de decisión. Es la normalización de NCC de las funciones de tiempo originales normalizadas con respecto a la NCC esperada teóricamente de funciones de tiempo independientes, NCC_{TE} . La correlación cruzada recién normalizada resultante para las funciones de tiempo RNCC se facilita en la fórmula 3, donde se estima NCC para funciones de tiempo, NCC_{TF} , según la fórmula 1 y se estima la NCC esperada, NCC_{TE} , según la fórmula 2.

El resultado facilitado en la ecuación 3 no es obvio porque la NCC para funciones de tiempo aleatorias (figura 1), y NCC para sismicidad inducida y volúmenes inyectados (figura 4) proporcionan valores estadísticamente significativos de máximos de NCC a 0,764 y 0,81, respectivamente, sin posibilidad de distinguir entre estos dos casos. La nueva normalización de los valores esperados teóricamente y NCC calculada proporcionan (de nuevo para los casos en las figuras 1 y 4, respectivamente) valor de RNCC = 0,136 para funciones aleatorias (es decir, la sismicidad no se induce por actividad técnica humana) y RNCC = 0,533 para el caso de sismicidad inducida.

45 b) Procesamiento de datos transformados

Otra ramificación del procedimiento que comprende las etapas 1, 2, 3B-5B y 6 (figura 5) aborda las funciones de tiempo que se transforman en funciones de tiempo eficaces (ETF) (variaciones de tiempo eficaces) antes de realizar la correlación cruzada. Se calcula una correlación cruzada normalizada de las ETF a partir de la fórmula (1), lo que da como resultado la NCC_{ETF} .

Se ha encontrado que el modo más eficaz para obtener la ETF es transformar la señal al dominio espectral de Fourier mediante transformada de Fourier discreta, multiplicar la parte real e imaginaria de la misma por una función de filtrado FF y transformar el resultado de vuelta al dominio de tiempo para obtener ETF. El ejemplo en la figura 3 muestra función de NCC de un sólo máximo. El máximo único significa que sólo hay un posible desplazamiento de tiempo (en este caso, aproximadamente cero) para hacer coincidir las ETF. El valor de un sólo máximo = 0,7 proporciona una fuerte indicación de que la sismicidad se induce por la actividad humana, por ejemplo tratamiento geofísico tal como tratamiento de pozos de producción.

60 Para algunas señales puramente aleatorias con estadística de ventanas de tiempo estacionarias, tales como desviación dependiente del tiempo constante (que no es un caso de actividad sísmica típico), la ETF puede crearse restando el valor medio de una función. Esto se conoce como la prueba de Pearson. La figura 2 muestra la prueba

de Pearson de los datos de la figura 1 (o la correlación cruzada de ETF de los datos de la figura 1) con NCC muy baja (0,21) que sería significativamente menor para series de tiempo más largas o el promedio de múltiples realizaciones aleatorias. Algunos ejemplos de otras construcciones de las “funciones de tiempo eficaces” son:

- 5 - filtrado con filtro paso alto, paso bajo o paso banda de una señal en el dominio de Fourier mediante un filtro arbitrario
- filtrado con filtro paso bajo de una señal en el dominio de tiempo restando el promedio de ventana móvil. El intervalo de tiempo de ventana depende del tiempo y puede ponderarse dependiendo la ponderación del tiempo.

10 Si la sismicidad presente dentro del intervalo de tiempo de actividad humana está inducida, entonces la NCC_{ETF} tiene un máximo global a aproximadamente tiempo cero correspondiente a un corto retardo de tiempo entre las dos funciones de tiempo. El valor del máximo global está por encima de la significación estadística (es decir, por encima de 0,5) y es positivo. La correlación cruzada sin tales características implica que la sismicidad no está relacionada con la actividad humana.

15 c) Proceso de decisión

20 Después de conocer los resultados finales de la ramificación A (figura 5, etapa 5A) y/o la ramificación B (figura 5, etapa 5B), puede tomarse la decisión en forma de “la sismicidad no está inducida” o “la sismicidad probablemente está inducida”. La decisión se basa en la independencia estadística de las funciones de tiempo tal como se representa en la parte inferior del diagrama de flujo en la figura 5. Se ha encontrado que los valores umbral más adecuados para la decisión SÍ/NO son de aproximadamente 0,45 para el proceso de la ramificación A y de aproximadamente 0,60 para el proceso de la ramificación B.

25 Los valores umbral de decisión se basan en el conocimiento empírico, se calibraron con las funciones de tiempo de la sismicidad inducida por el hombre y la sismicidad natural conocidas de la técnica anterior. El experto en la técnica es consciente del hecho de que los presentes valores umbral dependen de la región y, por tanto, se muestran como valores preferidos en los ejemplos específicos. El experto también conoce el enfoque de rutina sobre cómo someter a prueba/calibrar los valores umbral útiles para la realización de la presente invención. Se aplica lo mismo a las decisiones finales que se ven influidas por el conocimiento actual de procesos geofísicos pertinentes y por la exactitud de los datos obtenidos. Así, el experto es consciente de que no se da la respuesta final “la sismicidad está inducida” con el 100% de probabilidad.

30 Ambas ramificaciones A y B del proceso pueden usarse conjuntamente para proporcionar una decisión con significación estadística combinada (figura 5). Existen diez posibles combinaciones de respuestas de las ramificaciones A y B:

Respuesta de la ramificación A	Respuesta de la ramificación B	Decisión final (combinada)
SÍ	SÍ	“La sismicidad SÍ está inducida”
indeterminado	SÍ	“La sismicidad probablemente SÍ está inducida”
SÍ	indeterminado	“La sismicidad probablemente SÍ está inducida”
indeterminado	NO	“La sismicidad probablemente NO está inducida”
NO	indeterminado	“La sismicidad probablemente NO está inducida”
SÍ	NO	“La causa probable de sismicidad no está clara”
NO	SÍ	“La causa probable de sismicidad no está clara”
NO	NO	“La sismicidad NO está inducida”
SÍ	NO	“La causa probable de sismicidad no está clara”
NO	SÍ	“La causa probable de sismicidad no está clara”

40 Las respuestas determinan entonces si la sismicidad probablemente está inducida, probablemente no está inducida, o que la relación no es estadísticamente significativa. El término “indeterminado” representa la situación en la figura 5, etapas 5A o 5B, cuando hay significación estadística entre dos valores umbral para las respuestas “SÍ” y “NO”, respectivamente.

45 **Referencias**

Healy, J.H., W.W. Rubey, D.T. Griggs, C.B. Raleigh (1968). The Denver Earthquakes, Science, 161, n.º 3848, 1301-

1310.

Horton, S. (2012). Disposal of Hydrofracking Waste Fluid by Injection into Subsurface Aquifers Triggers Earthquake Swarm in Central Arkansas with Potential for Damaging Earthquake, *Seismol. Res. Lett.* 83(2), págs. 250-260.

5 Oprsal, I., y Eisner, L., 2012 Using Cross Correlation to Indicate Induced Sismicity. 2012 Seismological Society of America Annual Meeting, 17-19 de abril de 2012 San Diego, California, documento WO 2001/059481

10 Cesca, S *et al.* (2012). Discrimination of induced sismicity by full moment tensor inversion and decomposition, *Journal of seismology*, págs. 147-163.

REIVINDICACIONES

1. Método implementado por ordenador para discriminar entre sismicidad natural e inducida que comprende una etapa de adquirir datos de actividad humana y adquirir datos de sismicidad mediante un sistema de vigilancia para la misma ubicación y periodo de tiempo, y transformar los datos de sismicidad y datos de actividad humana en la primera función de tiempo y la segunda función de tiempo, respectivamente, caracterizado porque comprende la etapa de:
- determinar una correlación cruzada normalizada, NCC_{TF} , entre la primera función de tiempo y la segunda función de tiempo,
 - determinar una correlación cruzada normalizada de nuevo, RNCC, basándose en la correlación cruzada normalizada esperada teóricamente, NCC_{TE} , donde NCC_{TE} se calcula con la suposición de que la primera función de tiempo y la segunda función de tiempo son independientes entre sí,
 - evaluar la significación estadística de RNCC,
 - evaluar la probabilidad de que la sismicidad esté inducida por la actividad humana basándose en la significación estadística de RNCC.
2. Método implementado por ordenador para discriminar entre sismicidad natural e inducida que comprende una etapa de adquirir datos de actividad humana y adquirir datos de sismicidad mediante un sistema de vigilancia para la misma ubicación y periodo de tiempo, y transformar los datos de sismicidad y datos de actividad humana en la primera función de tiempo y la segunda función de tiempo, respectivamente, caracterizado porque comprende la etapa de:
- obtener la primera función de tiempo eficaz y la segunda función de tiempo eficaz mediante transformación matemática de la primera función de tiempo y la segunda función de tiempo, respectivamente,
 - determinar la correlación cruzada normalizada entre la primera función de tiempo eficaz y la segunda función de tiempo eficaz, NCC_{ETF} ,
 - evaluar la significación estadística de NCC_{ETF} ,
 - evaluar la probabilidad de que la sismicidad esté inducida por la actividad humana basándose en la significación estadística de NCC_{ETF} .
3. Método según la reivindicación 2, caracterizado porque la transformación matemática se selecciona de los siguientes métodos:
- transformar la función de tiempo al dominio espectral de Fourier mediante transformada de Fourier discreta, multiplicando la parte real e imaginaria de la misma por una función de filtrado y transformando el resultado de vuelta al dominio de tiempo,
 - restar el valor medio de una función,
 - filtrar con filtro paso alto, paso bajo o paso banda una función en el dominio de Fourier mediante un filtro arbitrario,
 - filtrar con filtro paso bajo una función en el dominio de tiempo restando el promedio de ventana móvil, opcionalmente usando un intervalo de tiempo de ventana ponderada dependiendo la ponderación del tiempo.

Fig. 1

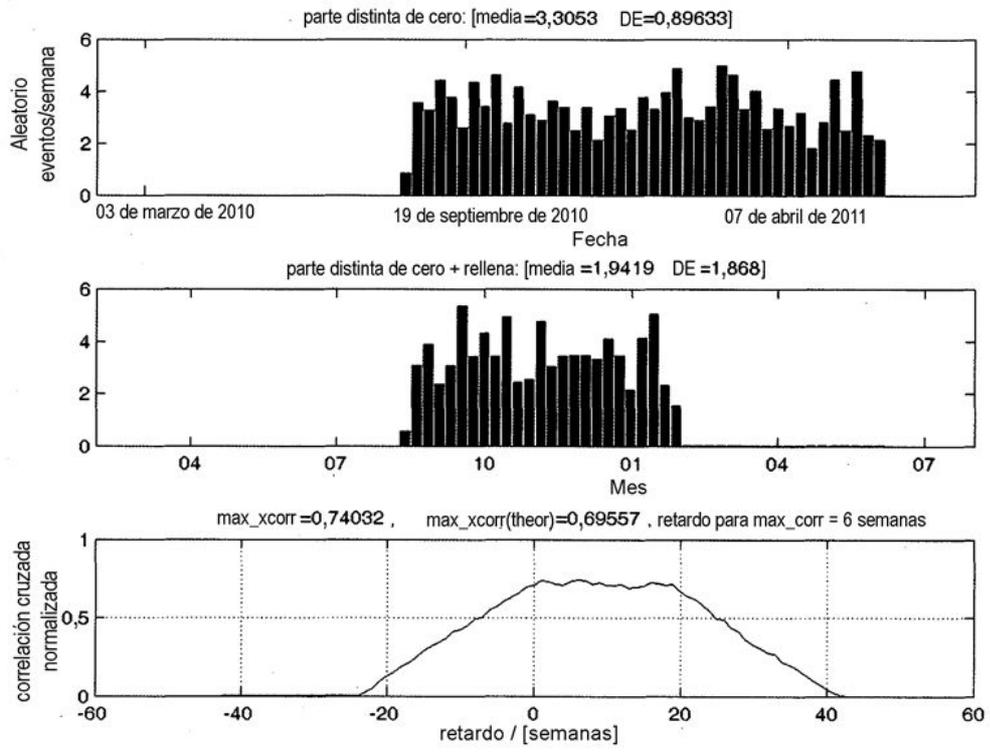


Fig. 2

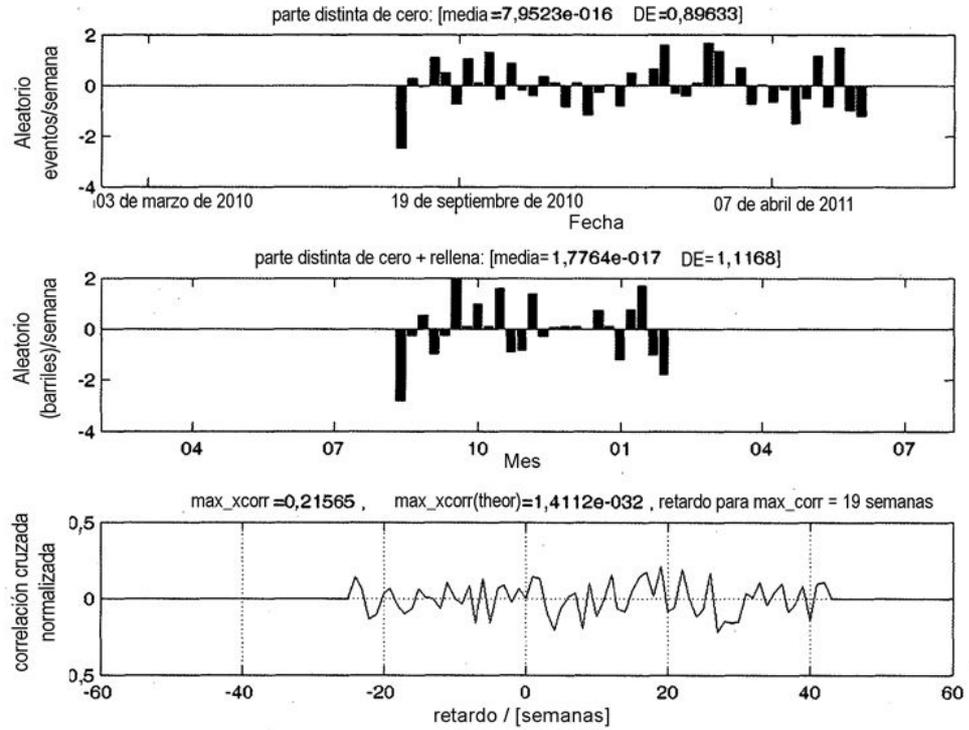


Fig. 3

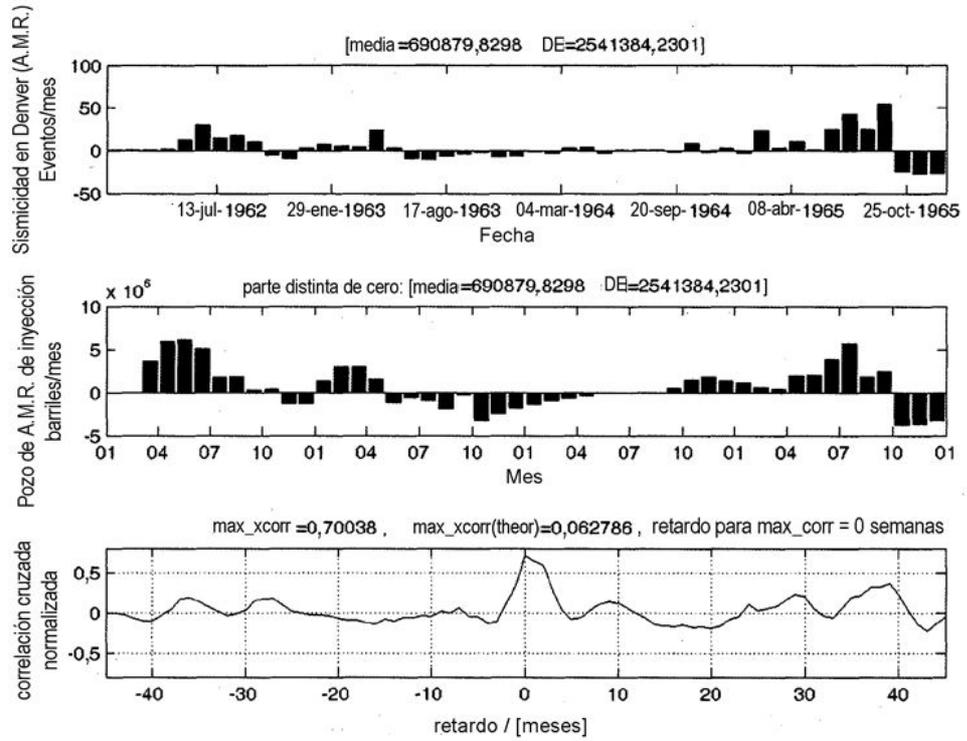


Fig. 4

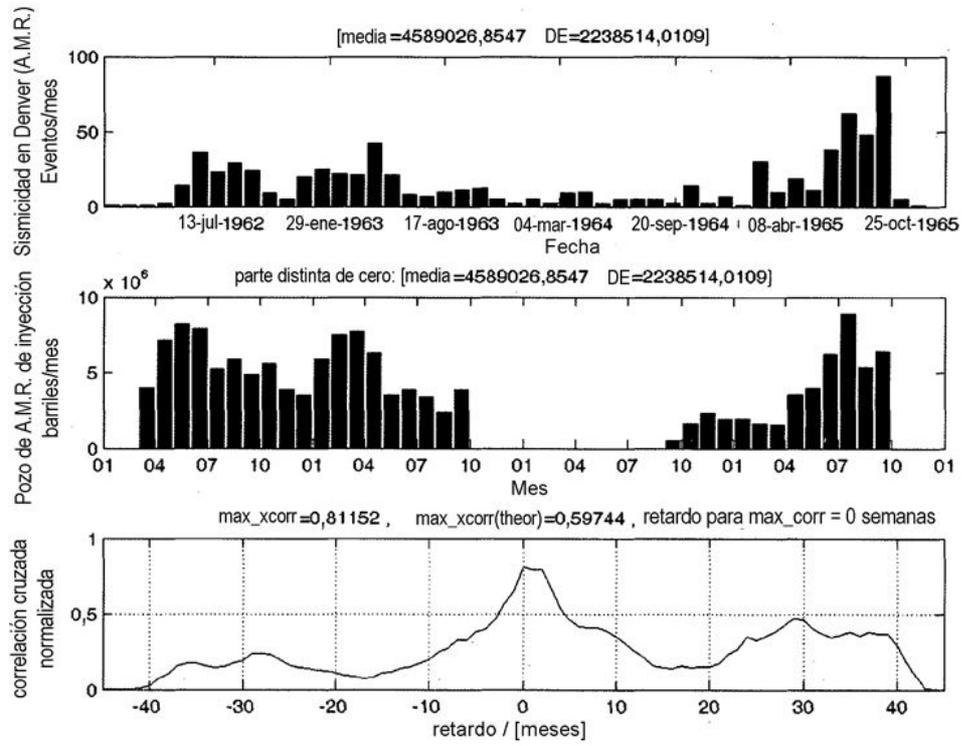


Fig. 5

