

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **2 640 934**

21 Número de solicitud: 201600258

51 Int. Cl.:

G01V 3/40 (2006.01)

G01W 1/00 (2006.01)

12

SOLICITUD DE PATENTE

A1

22 Fecha de presentación:

05.04.2016

43 Fecha de publicación de la solicitud:

07.11.2017

56 Se remite a la solicitud internacional:

PCT/ES2017/070189

71 Solicitantes:

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ (100.0%)

Plaza de San Diego, s/n

28801 Alcalá de Henares (Madrid) ES

72 Inventor/es:

GUERRERO ORTEGA, Antonio;

CID TORTUERO, Consuelo;

SAIZ VILLANUEVA, María Elena;

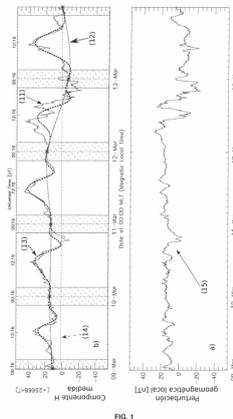
PALACIOS HERNÁNDEZ, Judith y

CERRATO MONTALBÁN, Yolanda

54 Título: **Dispositivo y procedimiento de obtención de la perturbación geomagnética local a latitudes medias**

57 Resumen:

La invención describe un dispositivo y un procedimiento para determinar la perturbación geomagnética local a latitudes medias mediante la eliminación de las diferentes componentes de campo geomagnético no perturbado, que resuelve los problemas existentes en el estado de la técnica conocido. Para ello en la presente invención se describe un modelo de día en calma geomagnética a latitudes medias para la componente horizontal (H) de campo geomagnético. El procedimiento implica la caracterización de día en calma o día perturbado mediante una valoración de la bondad del ajuste del modelo inventado a los datos medidos de la componente horizontal de campo magnético local, una vez sustraída una curva auxiliar de tendencia de los valores de noche. El procedimiento puede implementarse en el dispositivo para determinar la perturbación geomagnética local en tiempo real.



ES 2 640 934 A1

DESCRIPCIÓN

Dispositivo y procedimiento de obtención de la perturbación geomagnética local a latitudes medias.

5

Sector de la técnica

La presente invención se encuadra en el campo técnico de los dispositivos y métodos de producción de índices geomagnéticos con propósitos de meteorología espacial; más concretamente, la invención se refiere a los índices que ofrecen una medida de la perturbación geomagnética ocasionada en una zona localizada en la superficie de la Tierra por fuentes externas al planeta. La técnica propuesta es capaz de ofrecer información de la perturbación geomagnética a latitudes medias (alrededor de 40°) de alta resolución y en tiempo real.

10
15

Estado de la técnica

Problema técnico a resolver

Es conocido que el Sol tiene una actividad continua que afecta a la vida en la Tierra. La manifestación más evidente del efecto que el Sol produce en el planeta es la energía que llega hasta su superficie en unos 8 minutos en forma de radiación electromagnética, distribuida en diferentes rangos del espectro electromagnético, aunque la mayor aportación se encuentra en el visible.

20
25

Además de radiación, la corona solar está emitiendo de forma continua un flujo de partículas cargadas, conocido como viento solar, que se encuentra en estado de plasma y que viaja a través del espacio interplanetario ligado al propio campo magnético solar, interaccionando con todos los planetas, cometas y asteroides que se encuentra en el interior de la heliosfera. A la velocidad típica de 400 km/s este plasma magnetizado llega a la Tierra en unos 4 días e interacciona con el campo magnético dipolar terrestre distorsionándolo. La interacción resulta en un sistema complicado de movimientos de convección de plasma y corrientes eléctricas en el interior de la magnetosfera terrestre que dan lugar a la topología completa que ésta adquiere como situación de equilibrio o de "estado en calma".

30
35

Sin embargo, en el Sol, como estrella altamente dinámica con actividad cíclica de unos 11 años, también tienen lugar, de forma esporádica, fenómenos explosivos y violentos en las estructuras magnéticas y plasma que sostienen, dando lugar a distintos tipos de fenómenos como son: fulguraciones, prominencias, eyecciones de masa coronal (CME, acrónimo del inglés Coronal Mass Ejection), etc. En ellos se libera una cantidad ingente de energía, plasma y campo magnético que pueden afectar de forma importante el entorno terrestre cuando se dirigen hacia la Tierra. Asimismo, el viento solar rápido (HSS, del acrónimo inglés High Speed Stream) liberado de estructuras solares de mayor tiempo de vida que las CMEs, conocidas como agujeros coronales (CH, del acrónimo inglés Coronal Hole), pueden también producir efectos notables en el entorno terrestre.

40
45

Al ya complicado escenario presentado, hay que añadir que también pueden producirse partículas de alta energía (del orden de MeV) que viajan a velocidades cuasi-relativistas y que tardan unas pocas horas en alcanzar la Tierra. Es lo que se conoce como sucesos de partículas energéticas solares (SEP, del acrónimo inglés Solar Energetic Particles), que se producen en las fulguraciones solares o en las ondas de choque de las CMEs. A estos sucesos de partículas de origen solar muy energéticas se añaden partículas de origen extrasolar, los rayos cósmicos, cuyo rango energético se solapa con el de las

50

partículas solares más energéticas si bien la tendencia de su fluencia está anti-correlacionada con el ciclo solar.

5 Bajo condiciones de perturbación solar se producen cambios importantes en todas las escalas espaciales del entorno terrestre: magnetosfera, ionosfera, atmósfera, etc., y los efectos son detectables también en la superficie. Uno de los procesos físicos que tiene lugar cuando una CME interplanetaria alcanza la magnetosfera terrestre es la entrada de partículas en su interior y la consiguiente modificación del campo geomagnético, lo que se conoce como tormenta geomagnética.

10 Los efectos que las partículas energéticas, la radiación electromagnética y la modificación del campo geomagnético producen en el entorno terrestre, son muy variados y con escalas de tiempo muy diferentes. Pueden afectar de forma directa por ejemplo a la salud, o indirectamente, a través de fallos en tecnología que la sociedad usa diariamente, por ejemplo, en las comunicaciones radio, sistemas de navegación terrestre y de posicionamiento, e incluso en infraestructuras críticas como son las redes de potencia eléctrica, el transporte ferroviario o las grandes conducciones portadoras de gas o combustible entre países.

20 *Antecedentes*

Se sabe que la medida del campo magnético terrestre tiene varias contribuciones, como son: la generada por la propia Tierra por el efecto de dinamo interna, la generada por la actividad solar habitual (también denominada como "Sol en calma") y la generada por los fenómenos solares mencionados anteriormente que suceden de manera esporádica. El objeto de la presente invención se centra en la medida de las perturbaciones magnéticas a latitudes medias, para cuya determinación y correcta interpretación existen principalmente dos problemas: uno relacionado con la componente de "Sol en calma" y el otro relacionado con las perturbaciones causadas por la actividad solar que ocurren de forma irregular.

35 El primer problema está relacionado con el campo magnético generado por la llamada componente de "Sol en calma", producido por un sistema equivalente de corriente eléctrica de origen ionosférico que se produce en el lado diurno del planeta y que presenta verticidad a escala global, produciéndose uno en cada hemisferio y cuyos focos están localizados a latitudes medias. Este sistema no permanece fijo sino que deriva en longitud y latitud a lo largo del día y presenta una variabilidad día a día que provoca incertidumbre en la determinación correcta tanto de la intensidad como de la posición del foco.

40 El segundo problema viene causado porque las perturbaciones magnéticas que los fenómenos solares producen en la superficie terrestre a escala global en el rango de latitudes medias están bien representadas por indicadores globales diseñados al respecto, pero no así las perturbaciones magnéticas locales, cuyo desconocimiento en ocasiones da lugar a interpretaciones erróneas, incluso confundiéndolas en ocasiones con efectos globales. Por ejemplo, está profundamente asumido que a latitudes medias/bajas (rango de latitudes comprendido aproximadamente entre los 15° y 55° Norte y entre 15° y 55° Sur) la única fuente capaz de producir perturbaciones geomagnéticas de intensidad importante a escala global es la debida a la corriente magnetosférica de anillo, producidas por la intensificación de la población de partículas de baja energía que circulan alrededor de la Tierra bajo condiciones adversas de meteorología espacial (Gonzalez, W. D., *et al.* "What is a geomagnetic storm?" *Journal of Geophysical Research: Space Physics* 99, A4 (1994): 5771-5792). Sin embargo, publicaciones recientes (Cid, C., *et al.* "A Carrington-like geomagnetic storm observed in the 21st

century." *Journal of Space Weather and Space Climate* 5 (2015): A16 y Saiz. E., *et al.* "Searching for Carrington-like events and their signatures and triggers." *Journal of Space Weather and Space Climate* 6 (2016): A6) demuestran que a dichas latitudes medias pueden existir perturbaciones magnéticas locales de intensidad importante muy similares, e incluso bastante mayores que las perturbaciones causadas por la corriente del anillo. Estos recientes resultados de investigación establecen con especial importancia el papel que desempeñan los índices geomagnéticos locales en el campo de la Meteorología Espacial y crean nuevos requisitos en la precisión y fiabilidad de los mismos.

La componente de "Sol en calma" viene determinada por la contribución al campo geomagnético del sistema equivalente de las corrientes ionosféricas generadas por un efecto de dinamo en la zona iluminada de la Tierra. Posee un patrón de circulación que presenta un vórtice en cada hemisferio terrestre que deriva a lo largo del día, y sus focos se encuentran localizados aproximadamente en el rango de latitudes medias cercanas a 40°, tanto en el hemisferio Norte como en el hemisferio Sur. Este sistema de corrientes se identifica normalmente de manera mensual mediante el promedio de los cinco días del mes que menos perturbación geomagnética presentan, los cuales son internacionalmente establecidos (*IQD*, *International Quiet Days*). Esta representación y determinación de la variación diaria del día en calma es la que se usa actualmente, pero presenta varias desventajas. Cuando el propósito es obtener la perturbación global, dichas desventajas pueden ser irrelevantes, sin embargo, cobran especial importancia cuando el objetivo final es obtener la perturbación geomagnética localizada en una zona o región (índice geomagnético local) como el de la presente invención. Las principales desventajas vienen determinadas principalmente por tres motivos:

- a) la perturbación magnética en una zona puede llegar a presentar diferencias importantes respecto de otra y, por tanto, la definición internacional de tiempo en calma, la cual está basada en un índice global (índice K_p), puede conducir a error cuando la perturbación geomagnética afecta solamente a una zona muy localizada;
- b) la determinación de días en calma usando como tiempo base el tiempo universal (*UT*, Universal Time, por sus siglas en inglés). Aunque es la usada en los *IQDs*, no es, por definición, una forma práctica de detallar un día en calma para una zona con carácter local ya que, inevitablemente, el día local (con tiempo base el tiempo local (*MLT*, Magnetic Local Time, por sus siglas en inglés)) estará desplazado respecto del tiempo universal;
- c) la variabilidad inherente que existe entre días de calma, que hace que la determinación mediante el promediado de varios días pueda resultar en una representación del día en calma local muy diferente de la real. Además, para latitudes medias que son las de localización de los focos de este sistema de corrientes ionosféricas este problema es aún más importante.

El objeto de la presente invención es el desarrollo de un procedimiento y un dispositivo que, a partir de la medida del campo geomagnético local a latitudes medias, sea capaz de estimar la componente de perturbación debida a fenómenos asociados a la actividad solar esporádica. Para ello se tienen en cuenta los problemas descritos anteriormente y en especial los que afectan a latitudes medias.

Se conocen antecedentes sobre dispositivos y procedimientos para predecir la variación del campo geomagnético local, como el que se describe en el documento WO 2015/013499 A1. Sin embargo, como se expone en esta memoria, las técnicas de tratamiento de las medidas de campo geomagnético para la obtención de la perturbación

geomagnética local existentes en el estado de la técnica presentan notables diferencias con respecto a las que se exponen en la presente invención.

Descripción de la invención

5

La presente invención describe un procedimiento y dispositivo capaces de obtener la componente de perturbación geomagnética local a latitudes medias a partir de la medida del campo magnético en la superficie terrestre. Dicha medida debe de ofrecer al menos la componente horizontal del campo geomagnético en la superficie de la Tierra y puede

10

obtenerse directamente desde sensores geomagnéticos debidamente calibrados y aislados de cualquier perturbación electromagnética artificial. Dicha medida también puede obtenerse de los datos que ofrecen en tiempo real los observatorios geomagnéticos a través de conexiones remotas.

15

En la medida del campo magnético en la superficie terrestre se pueden englobar principalmente tres componentes: una componente interna, componente I), compuesta a su vez por la componente principal, cuyo origen está en el proceso de dinamo que tiene lugar en el interior de la Tierra y una componente debida a la corteza y manto terrestres:

20

una componente de "Sol en calma", componente II), originada por el sistema equivalente de las corrientes ionosféricas de naturaleza diurna; y una componente de perturbación, componente III), debida a fuentes externas al entorno terrestre, como es la que se produce de manera irregular y esporádica por causa de la actividad solar.

25

La presente invención trata sobre la determinación de las primeras dos componentes, para obtener la tercera, la perturbación geomagnética local generada por la actividad solar, con objeto de poder predecir situaciones potencialmente peligrosas como las que se han enumerado en el epígrafe *Problema técnico a resolver*.

30

La técnica usada en la presente invención determina en primera instancia la componente II), que posee variación (de magnitud considerable, del orden de decenas de nanoteslas) de período de tiempo más corto (un día), frente a periodos del orden de meses, o mayores, de la componente I). Este método contrasta con el modo tradicional de proceder, en el que se suele obtener en primera instancia la componente I, por poseer variaciones más lentas. Esto es posible gracias al método usado en la presente invención

35

para la obtención de la componente II), que mediante un modelo de comportamiento de día en calma es capaz de determinar de manera unívoca la curva de variación diaria para los días no afectados por perturbaciones externas.

40

Además, la correcta determinación de la componente II) durante un conjunto de días prolongado en el tiempo, permite obtener la componente I). Aunque la componente I) posee variaciones lentas, su comportamiento es difícil de pronosticar. Existen modelos geomagnéticos, como es el modelo *IGRF (International Geomagnetic Reference Field, Campo Geomagnético de Referencia Internacional)*, que proporcionan estas componentes para valores pasados, presentes, y con proyección en algunos años hacia

45

el futuro (no más de cinco), pero su precisión, tanto espacial como temporal, no suele ser suficiente para muchas aplicaciones.

50

Como consecuencia, en la presente invención, la componente I) se obtiene de los datos medidos, pero no directamente, sino después de realizar una parte del procesamiento para la obtención de la componente II). Esta forma de proceder aporta a la invención dos características importantes, por un lado, independencia absoluta del procedimiento sobre datos externos, y por otro lado mayor precisión para la obtención de las componentes para la localización concreta de la medida, pues no se depende de datos derivados con carácter global como ocurriría con el uso de índices o modelos geomagnéticos.

Para determinar la componente II), como se ha mencionado, se realiza un ajuste de un modelo de día en calma a los datos representativos de la variación diaria. Para ello, previamente se sustrae de manera auxiliar una curva suave de tendencia de los valores de noche, es decir, una curva que une los valores del campo geomagnético medido en las horas de noche, menos afectadas por la variación diaria. Analizando la bondad del ajuste del modelo a los datos se obtiene una valoración de la calma geomagnética de los mismos, es decir, es posible conocer cuando los datos poseen una curva de variación diaria representativa de día en calma. Esta característica hace posible la determinación de la componente I) a partir de la acumulación de días calificados como de calma.

La componente I) se puede determinar de varias formas, por ejemplo mediante una curva de interpolación de valores promedios mensuales o anuales de los días en calma geomagnética seleccionados de la forma descrita anteriormente. Una variante puede ser usar como alternativa sólo los días de calma oficiales (International Quiet Days) establecidos internacionalmente por GFZ-Potsdam. Otra variante puede ser usar los valores promedio mensuales o anuales de los observatorios geomagnéticos más cercanos a la zona de medida.

La componente III) de perturbación geomagnética (objetivo final de la presente invención) se obtiene eliminando las componentes I) y II) a los datos medidos. Para los días de calma geomagnética en los que el modelo ofrece un ajuste bueno a los datos, la componente II) que debe de eliminarse es precisamente la curva de variación diaria obtenida del ajuste del modelo. Para los días en los que el ajuste del modelo no es bueno, se presentan varias alternativas. Se puede eliminar la curva de variación diaria del día en calma más próximo en el tiempo, el promedio de varios días o incluso no eliminar ninguna curva de variación diaria.

En el estado de la técnica existen métodos de interpolación para datos de medida geomagnética, por ejemplo, en el documento WO 2015/013499 A1, pero el objetivo suele ser siempre la determinación de la componente I), de variación más lenta y menor complejidad que la curva de variación diaria a latitudes medias.

El carácter innovador de la presente invención es posible gracias a la aplicación del modelo de día en calma. Dicho modelo se define mediante una curva de interpolación suave que pase por puntos que se encuentran fijados a determinada posición temporal del día. El modelo representa la variación geomagnética sufrida en la zona iluminada de la Tierra, zona de día, por tanto, se diferencian dos tipos de puntos, unos fijados a intensidad nula en las horas de noche, puntos (N), y otros libres en cuanto a intensidad, en la zona de día, puntos (P), y que ofrecen como parámetros los grados de libertad necesarios para el ajuste del modelo. Para que la curva de variación diaria pueda tomar cualquier forma posible típica de las latitudes magnéticas medias, y al mismo tiempo, impedir que el modelo ofrezca un ajuste bueno a otras variaciones geomagnéticas de perturbación externa que deben de quedar excluidas, los puntos (P) deben de ser cuatro, estar colocados en la horas de día (entre las 6 h y 18 h) y con una distancia entre ellos entre una y tres horas.

Descripción de los dibujos

Para complementar esta descripción, y con objeto de ayudar a una mejor comprensión de las características de la invención, se acompaña, como parte integrante de dicha descripción, un juego de dibujos en donde, con carácter ilustrativo y no limitativo, se ha representado lo siguiente:

5 - la figura 1 muestra en el panel a) la evolución temporal de la componente horizontal del campo geomagnético local, componente H, en un periodo concreto de tiempo (del 9 al 13 de marzo de 2001), en una localización concreta (observatorio de San Pablo de los Montes, Toledo, España) a modo de ejemplo y además incluye las curvas implicadas en el procedimiento objeto de la invención y en el panel b) la figura muestra el resultado de aplicar el procedimiento objeto de la invención, es decir, la componente III) de perturbación geomagnética local;

10 - la figura 2 ilustra el diagrama de flujo del procedimiento para la determinación de la perturbación geomagnética local en la superficie terrestre;

- la figura 3 es un detalle ampliado del ajuste de los datos a la curva de variación diaria en un intervalo temporal de un día de duración;

15 - la figura 4 representa un esquema del dispositivo asociado a la invención sobre una de las realizaciones preferentes de la misma.

A continuación se incluye una lista con los distintos elementos que se representan en las figuras:

- 20
- 11 (trazo continuo): componente horizontal del campo geomagnético medido;
 - 12 (trazo de puntos): curva de tendencia de valores de noche calculada;
 - 25 • 13 (trazo discontinuo de guion grueso): curva de variación diaria de la componente horizontal del campo geomagnético local calculada;
 - 14 (trazo discontinuo de guion fino): línea base asociada a la componente horizontal del campo geomagnético local asociada al campo magnético generado en el interior, la corteza y el manto terrestres;
 - 30 • 15: perturbación magnética de la componente horizontal del campo magnético local;
 - 20: bloque del diagrama de flujo de pre-procesado de la componente horizontal de campo geomagnético medido;
 - 35 • 21: bloque del diagrama de flujo para la determinación de la curva de variación diaria;
 - 22: bloque del diagrama de flujo para la determinación de la línea base;
 - 40 • 23; bloque del diagrama de flujo para el cálculo final que determina la perturbación geomagnética local;
 - 45 • 211: etapa de determinación y sustracción de la curva auxiliar de tendencia de los valores de noche;
 - 212: etapa de ajuste del modelo de variación diaria a los datos procedentes de la etapa anterior;
 - 50 • 213: etapa de decisión sobre la determinación o no de los datos actuales como pertenecientes a día geomagnético en calma;

- 214: etapa de búsqueda del día geomagnético en calma más cercano al actual en la base de datos 225, que se ejecuta tras una respuesta negativa en 213;
- 5 • 225: base de datos de los días geomagnéticos en calma guardados tras respuestas positivas en 213;
- 226: etapa de cálculo de la línea base;
- 10 • 31 (trazo continuo): curva de los datos a ajustar por el modelo de día en calma, calculados a partir de la componente horizontal de campo magnético y una vez sustraída la curva auxiliar de tendencia de los valores de noche;
- 32 (trazo discontinuo de guion grueso): curva de variación diaria obtenida del ajuste del modelo de día en calma;
- 15 • 331-334: puntos de control del spline cúbico, de tipo (N), fijos en posición temporal (horizontal) y en intensidad (vertical), del modelo de día en calma;
- 341-344: puntos de control del spline cúbico, de tipo (P), fijos en posición temporal pero libres en intensidad, del modelo de día en calma;
- 20 • 40: dispositivo de obtención de la perturbación geomagnética local;
- 41: unidad de entrada de datos del dispositivo 40;
- 25 • 42: CPU del dispositivo 40;
- 43: unidad de almacenamiento de datos del dispositivo 40;
- 30 • 44: unidad de salida de datos del dispositivo 40.

Descripción de una forma de realización de la invención

35 Como es sabido, la medida del campo magnético en la superficie terrestre posee diferentes contribuciones que, en determinadas situaciones, pueden ser identificadas como tres componentes distintas:

- 40 I) una componente interna, compuesta por la componente principal, cuyo origen está en el proceso de dinamo que tiene lugar en el interior de la Tierra y una componente debida a la corteza y manto terrestre;
- II) una componente de "Sol en calma", originada por el sistema equivalente de las corrientes ionosféricas de naturaleza diurna;
- 45 III) una componente de perturbación, debida a fuentes externas al entorno terrestre, como es la que se produce de manera irregular y esporádica por causa de la actividad solar.

50 La presente invención trata sobre la determinación de las primeras dos componentes I), II) para obtener la perturbación geomagnética local generada por la actividad solar, componente III), con objeto de poder predecir situaciones potencialmente peligrosas como las que se han enumerado en el epígrafe *Problema técnico a resolver*.

Visión global del procedimiento

Para dar una visión global y una mejor comprensión del procedimiento se han realizado las figuras 1 y 2 que muestran las curvas implicadas en el procedimiento y un diagrama de flujo del mismo, respectivamente.

En la figura 1 se ha representado en el panel superior (1a) la evolución de la componente horizontal del campo geomagnético local medido, curva (11), junto con las diferentes curvas implicadas en el procedimiento, (12)-(14). En el panel inferior (1b) se ha representado el resultado de aplicar el procedimiento descrito en la presente invención, curva (15). En el caso de la figura 1a, los datos medidos, representados por (11), han sido proporcionados por el observatorio geomagnético de San Pablo de los Montes en Toledo, España, identificado internacionalmente con las siglas SPT (código dado por el organismo IAGA, International Association of Geomagnetism and Aeronomy). El número entre paréntesis que figura en el título del eje de ordenadas corresponde al valor (expresado en nanoteslas, nT) que hay que sumar a los valores ofrecidos en el eje de ordenadas para obtener el valor absoluto de la medida. En el eje de abscisas inferior se representa el tiempo en el que se hace la medición, dado en hora local magnética (*MLT*). El eje de abscisas superior representa tiempo expresado en tiempo universal (*UT*). La diferencia de 16 minutos que se aprecia entre ambas escalas de tiempo corresponde a la diferencia temporal equivalente a la diferencia entre la longitud geográfica de referencia del meridiano de Greenwich y la longitud del observatorio SPT donde se realiza la medida. La ventana temporal de la figura 1 tiene una duración de cinco días.

En la figura 2 se muestra el diagrama de flujo del procedimiento completo. Como puede observarse existe un bloque inicial (20), dos bloques o sub-procedimientos principales orientados verticalmente (21) y (22), y un bloque final (23). Los bloques principales llevan a cabo la determinación de la componente II) en el bloque (21) y la determinación de la componente I) en el bloque (22). El bloque final (23) no es más que una sustracción de las componentes I) y II), resultados de (21) y (22), a la componente H de los datos medidos.

El primer bloque (20) es un pre-procesado de los datos medidos donde se realiza, entre otras operaciones, una asociación de los valores a su referencia temporal en el sistema local magnético *MLT*. Para ello es necesario que la medida del campo geomagnético se acompañe de alguna referencia temporal en la que se realiza la medida, como puede ser la hora universal (*UT*). Para realizar la conversión a tiempo *MLT* es preciso aportar la posición en longitud del lugar en la que la medida se ha realizado. Asimismo, en el pre-procesado se incluye la transformación del sistema de coordenadas, si fuera necesario, desde las componentes de campo proporcionadas por el sistema de medida a un formato del que sea posible extraer la componente horizontal (*H*).

La evolución del campo geomagnético local medido, dado por la curva (11) de la figura 1, supone la superposición de las tres componentes: I), II) y III) previamente mencionadas. Para obtener lo que de ese valor corresponde a la componente de perturbación geomagnética (componente III)), medida localmente en un punto concreto de la geografía, y debida a fuentes externas, es decir, como consecuencia de la actividad solar esporádica, es necesario eliminar las componentes I) y II) descritas anteriormente. En la figura 1a) también se representan otras tres curvas: (12) es la curva auxiliar de tendencia de valores de noche, usada en el bloque (211); (13) es la curva de variación diaria (componente II)), y (14) es la línea base representativa de la componente I).

La técnica usada en la presente invención determina en primera instancia la componente II) por ser la que posee variación (de magnitud considerable) de periodo de tiempo más corto (un día), frente a periodos del orden de meses o mayores de la componente I).

5 Además, la correcta determinación de la componente II) durante un conjunto de días prolongado en el tiempo, permite obtener la componente I). Aunque la componente I) posee variaciones lentas, su comportamiento es difícil de pronosticar. Existen modelos geomagnéticos, como es el modelo IGRF, que proporcionan estas componentes para valores pasados, presentes, y con proyección en algunos años hacia el futuro (no más de
10 cinco), pero su precisión, tanto espacial como temporal, no suele ser suficiente para muchas aplicaciones. Además, estos modelos se obtienen de procesos en los que previamente se ha eliminado la componente de perturbación externa (la componente III) mencionada) mediante una interpretación global de la misma, por ejemplo, mediante el uso de índices indicadores de perturbación geomagnética no local sino global como son
15 el índice *Dst* o el índice *Kp*. Por tanto, cuando el propósito es obtener la perturbación geomagnética local con precisión, como en la presente invención, no es adecuado hacer uso de dichos modelos geomagnéticos. Como consecuencia, en la presente invención, la componente I) es obtenida a partir de los datos observados en la misma localización donde se realiza la medida. Esta característica se puede apreciar mejor observando el
20 diagrama de flujo de la figura 2: la componente I, obtenida en el bloque (22), se obtiene de los datos originales medidos (20), pero no directamente, sino después de realizar una parte del procesamiento para la obtención de la componente II en el bloque (21). Esta forma de proceder aporta a la invención dos características importantes, por un lado, independencia absoluta del procedimiento sobre datos externos, y por otro lado mayor
25 precisión para la obtención de las componentes para la localización concreta de la medida, pues no se depende de datos derivados con carácter global como ocurriría con el uso de índices o modelos geomagnéticos.

Modelo de día en calma

30 La componente II) de variación diaria se determina gracias a un modelo de día en calma (relativo a la componente horizontal de campo geomagnético) válido para una latitud magnética cercana a la de la localización del foco del sistema de corrientes ionosféricas (aproximadamente entre los 35° y 45° desde el ecuador en ambos hemisferios), de la
35 presente invención. El modelo se caracteriza por estar definido mediante un spline cúbico, es decir, una curva diferenciable definida a tramos mediante polinomios cúbicos (polinomios de tercer grado). Los puntos de control son el lugar de unión de los tramos y el lugar donde se imponen ciertas condiciones que hacen que la transición ocurra de forma suave. Para un spline cúbico, dichas condiciones son tres y se deben de cumplir en
40 cada punto de control. Estas tres condiciones implican continuidad de las funciones en los puntos de control, y se traducen en que tanto la evaluación del polinomio en el punto de control, como el de su primera derivada y su segunda derivada deben ser iguales para los dos polinomios existentes a cada lado del punto de control.

45 El modelo de día en calma para esta forma de realización de la presente invención está compuesto por ocho puntos de control distribuidos en el tiempo a lo largo de un día, 24 horas, de manera fija en determinadas horas del día, tal y como se muestra en la figura 3, representados por rombos y asteriscos, diferenciando dos tipos, paramétricos (P) y neutros (N), respectivamente. La figura 3 muestra dichos puntos en un ejemplo de día en
50 calma geomagnética; a los datos mostrados como elemento (31), se ha ajustado el modelo de variación diaria, obteniendo la curva (32). Los datos mostrados en (31) no son los datos originales medidos, resultado del bloque (20), sino que previamente se ha sustraído una curva auxiliar en la etapa (211) tal y como se describe en el siguiente apartado. Los cuatro puntos (N) corresponden a dos puntos en las primeras cuatro horas

del día y a otros dos puntos en las cuatro últimas horas del día, es decir, ocupando las horas de noche local (de ahí su denominación con la letra N). Estos puntos (N) están caracterizados por estar situados a una intensidad de campo magnético fijada en un valor de cero respecto del valor de base del modelo de día en calma. Los restantes cuatro puntos de control, puntos (P), están situados en la zona central, correspondientes a las horas de día del lugar y poseen la característica de tener una intensidad variable, ofreciendo cada uno de ellos un parámetro libre al modelo que permite el ajuste de los datos al mismo. Además, en los dos puntos (N) de los extremos (los correspondientes a 0 h y 24 h) se impone la condición de que la primera derivada sea nula. El modelo definido de esta forma posee cuatro grados de libertad, debido a los cuatro parámetros libres (P) de la zona central en las horas de día.

Determinación de la curva auxiliar de tendencia de /os valores de noche

Puesto que se parte de datos observacionales medidos en la superficie terrestre (que, como se describió anteriormente, son el resultado de la superposición de cuatro componentes), para poder realizar un ajuste del modelo de día en calma, con el objetivo de obtener la componente II), los datos a los que se ajusta deben de contener la mínima aportación de las otras dos componentes restantes; I) y III). La técnica adoptada en la invención pasa por determinar primeramente una aproximación de las dos componentes I) y III) superpuestas, que se restan de los datos originales de manera auxiliar, y que permite realizar un ajuste del modelo de día en calma sólo a los valores de variación diaria que mejor representen la componente II). Esta curva de aproximación, a la que se ha denominado curva de tendencia de los valores de noche (elemento (12) en figura 1b), es una curva de interpolación suave entre un sólo punto diario obtenido a partir del valor medio de las horas de noche, descrita en detalle más adelante.

Para entender la importancia y a su vez la validez de la determinación de la curva auxiliar hay que tener en cuenta el posible comportamiento de las otras dos componentes. La componente I), como ya se dijo, posee variaciones lentas comparadas con la variación diaria y, por tanto, una evaluación del tipo que se plantea con un solo punto diario (representando el valor medio de la zona de noche), es más que suficiente para asegurar su correcta descripción. La componente III) de perturbación externa contempla variaciones geomagnéticas de muy diversa índole, que para los propósitos de la presente invención podemos diferenciar en dos tipos: III-A) variaciones de intensidad importante que perturban el campo magnético de manera irregular y esporádica, difícilmente predecibles y que impiden una correcta determinación de la componente II) de variación diaria; y III-B) variaciones suaves pero mantenidas, de más de un día de duración y que pueden estar presentes en día de calma geomagnética, debida a perturbaciones en los días previos. Las variaciones de tipo III-A) poseen cambios rápidos e importantes que resultaran en un ajuste del modelo de día en calma no valido, y por tanto, aunque no sea posible una determinación de la misma, si que se puede constatar su presencia mediante la medida de la bondad del ajuste, como se verá más adelante. La variación III-B) se traduce en un aumento, o disminución suave, del nivel diario del campo geomagnético medido, y por tanto la evaluación mediante una curva obtenida por un punto diario también asegura su correcta determinación previa al ajuste.

En este punto hay que aclarar que el hecho de determinar, con carácter previo al ajuste del modelo de día en calma, la curva de tendencia (12) como aproximación de las componentes I) y III-B), no significa que dicha variación sea eliminada de forma definitiva de los datos observacionales originales, pues como se verá más adelante, ésta sólo se usa como curva auxiliar para determinar la componente de variación diaria. Para aclarar en lo que viene la terminología usada, se diferenciará entre eliminación, término con el que se quiere señalar que es la operación de sustracción definitiva de una contribución y

con la que se obtiene un resultado intermedio o final; y el término sustracción, con el que se señala que se hace la operación aritmética de resta, pero sólo como proceso intermedio que no implica la eliminación definitiva sobre los datos originales.

- 5 La curva auxiliar de tendencia de los valores de noche (12) se obtiene a partir del valor promedio alcanzado en un conjunto de horas de noche que se elige de antemano dentro de un rango simétrico (máximo 4 horas) de horas anteriores y posteriores a la medianoche local de tránsito entre un día y el siguiente. En el caso del ejemplo para cinco días mostrado en la figura 1b), los valores medios para las seis horas de noche
10 están representados por asteriscos, la zona de las horas de noche utilizadas, desde las -3h a las +3h respecto de la medianoche local, están marcadas con fondo de rayas oblicuas. La curva suave que pasa por dichos valores medios de noche se ha realizado mediante un spline cúbico, aunque podrían usarse otros métodos de interpolación mediante curva suave similares. Una vez determinada la curva de tendencia de los
15 valores de noche, ésta se sustrae de los datos medidos y se procede al ajuste del modelo de día en calma sobre el resultado de la sustracción.

Calificación y almacenamiento de días geomagnéticos en calma

- 20 El ajuste del modelo de día en calma a los datos se puede realizar mediante la minimización de una función como la del error cuadrático medio y evaluando la bondad del ajuste por medio del *chi cuadrado*. El método usado es un proceso iterativo en el que se establecen unos valores iniciales para los cuatro parámetros del mismo y se evalúa la bondad del ajuste. En el proceso, se modifican los parámetros hacia el valor que
25 minimice la función de error, de forma que estos deben de converger hacia un valor estable siempre que los datos posean una variación diaria típica de día geomagnético en calma. El método iterativo puede acabar mediante un número de iteraciones (si no converge) o mediante el establecimiento de un umbral en el incremento relativo del valor de la bondad del ajuste entre una iteración y la siguiente, de manera que para
30 incrementos inferiores al umbral, asegure que se ha finalizado el proceso de convergencia del mismo.

- El valor final de la bondad de ajuste (valor del *chi cuadrado*) se usa en esta etapa (213), ver figura 2, para discriminar entre día en calma del que no lo es. Si el valor es
35 suficientemente elevado indica que el ajuste no es bueno, seguramente porque los datos poseen perturbación geomagnética y, por tanto, no puede ser considerado como día en calma. La curva así determinada no debe de usarse como componente II). Por otro lado, el resultado con un valor del *chi cuadrado* pequeño confirma que la curva resultante del ajuste es una curva válida de día en calma y, por tanto, no sólo se debe de eliminar como
40 componente II), sino que debe de ser almacenada en una base de datos (etapa (225) en figura 2) que permitirá determinar la componente I).

- Para realizar esta discriminación de forma adecuada, se establece un valor umbral para la bondad del ajuste, que puede ser determinado de varias formas dependiendo de la
45 cantidad de datos previos conocidos. Si se tienen datos históricos de manera continuada durante varios años, es posible realizar un estudio de la distribución de probabilidad de los valores del *chi cuadrado* obtenidos para los ajustes del modelo a cada día y establecer el umbral en un valor suficientemente alto como para asegurar una probabilidad cercana a cero de encontrar un día en calma para valores por encima de ese
50 umbral. Si no se poseen datos históricos de forma continuada pero sí un período de varios días, para establecer el umbral se puede realizar un estudio comparativo del valor de la bondad de ajuste entre días calmados y perturbados.

En el caso más desfavorable que no se posea ningún dato previo, se sabe que el modelo de día en calma descrito en la presente invención posee cuatro grados de libertad, por tanto, la distribución del *chi cuadrado* teórica suponiendo sólo días en calma con una distribución de error normal, puede servir de referencia para establecer el umbral en un valor que indique una probabilidad de encontrar un día en calma superior al 99.9%.

En el caso particular de la presente forma de realización de la invención, el umbral ha sido obtenido a partir de la función de distribución del *chi cuadrado* que resulta del ajuste de los datos desde 1997 hasta 2012, estableciendo el umbral en 40.

Cuando un valor de la bondad del ajuste supera el umbral establecido, como se ha comentado anteriormente, la curva obtenida en el ajuste no debe usarse como representativa de día en calma pues indica la presencia de perturbación geomagnética. Esto no implica la no existencia de una componente de variación diaria, pues ésta está siempre presente y, por tanto, debe de usarse otra curva alternativa (etapa (214) del procedimiento de la figura 2). Uno de los métodos más extendidos en uso es el de promediar varios días en calma representativos del mes (los IQDs u otros equivalentes elegidos a partir de los datos del observatorio), pero como ya se describió anteriormente, esta no es la mejor opción a adoptar debido a la variabilidad día a día que pueden presentar las curvas de variación diaria, especialmente a las latitudes para las que se usa la presente invención. La curva de variación diaria a usar de forma alternativa que implica una menor probabilidad de error es la curva de día en calma válida más cercana en el tiempo. Como puede apreciarse a simple vista en la figura 1 b), el día 12 de marzo posee una componente de perturbación mayor que el resto de días, el resultado del ajuste del modelo de día en calma para ese día resulta en un valor del *chi cuadrado* superior al umbral y, por tanto, se ha considerado como curva de variación diaria válida la curva del día anterior, que fue catalogado como día en calma por la bondad de su ajuste, como puede apreciarse a simple vista al comparar las curvas (11) y (13) en la figura 1b).

Determinación de la componente I)

Como ya se ha mencionado anteriormente, la componente I) posee variaciones lentas, del orden de unos pocos nanoteslas (nT) en un periodo superior al mes y, por tanto, pueden eliminarse de forma conjunta por tener periodicidades muy superiores a la de interés, que es de un día. El método usado para ello es mediante la generación de una curva suave de interpolación, línea base, que pasa por puntos separados una distancia temporal. Con objeto de tener en consideración, si se desea, variaciones magnéticas con periodicidades grandes (estacionales, anuales, de ciclo, etc.) se considera que la distancia temporal mínima entre puntos debe ser al menos de un mes, aunque otras distancias superiores pueden ser elegidas.

Los valores de los puntos por los que pasa dicha línea base pueden obtenerse de los valores promedios del intervalo temporal considerado. Estos valores promedio pueden obtenerse de diferentes formas. En su forma prioritaria de funcionamiento éstos son calculados a partir de los días geomagnéticos en calma catalogados como válidos y almacenados en la base de datos (225) como producto de la etapa (213). En el caso de la figura 1b), la línea base así obtenida con valores anuales se muestra como elemento (14). En caso de que no se disponga de suficientes elementos en la base de datos (225) debido, por ejemplo, a la puesta en funcionamiento por primera vez del dispositivo, se pueden usar los valores promedio oficiales que ofrecen los observatorios geomagnéticos o, en su defecto, los valores promedio calculados a partir de los ofrecidos por modelos geomagnéticos como el IGRF.

Determinación de la perturbación geomagnética

Una vez determinada la línea base (14), representativa de la componente I), resultado del bloque (22) de la figura 2, y la curva de variación diaria (13), representativa de la componente II), obtenida como resultado del bloque (21), éstas son eliminadas de los datos medidos pre-procesados para obtener el valor de la perturbación geomagnética local, componente III), representado en la figura 2 como bloque (23).

Dispositivo para la implementación del procedimiento

El procedimiento descrito en la presente invención puede implementarse por ejemplo, en un dispositivo como el mostrado en la figura 4 como elemento (40). Los datos de entrada (41) se obtienen mediante una conexión remota a ficheros que pueden ser actualizados en tiempo real y que contienen la componente horizontal del campo geomagnético medido al menos por dos sensores magnéticos debidamente alineados en el plano horizontal. Los sensores pueden ser de tipo *fluxgate* y la medida debe ser estable en el tiempo y estar aislada de interferencias por tecnología externa.

Además, se debe registrar el tiempo de referencia local magnético, para el cual se necesita conocer, al menos, la hora de tiempo universal (UT) en la que se realiza cada medida, y la coordenada de la longitud geomagnética del punto de medida. La entrada de datos puede realizarse directamente a un fichero de texto con los datos actualizados con la medida más reciente.

El dispositivo (40) posee una unidad de control y proceso (42), CPU, del procedimiento descrito en la presente invención. La unidad de cálculo debe ser capaz de realizar valores promedios, diferencia aritmética de vectores de datos (curvas), cálculo de spline cúbicos y cálculo de error cuadrático medio y de *chi cuadrado*. La unidad de proceso debe ser capaz de implementar el procedimiento mostrado en la figura 2 y, por tanto, debe ser capaz de ejecutar sentencias de control del tipo *if* para la etapa (213) y bucles *for* para el procesado iterativo de ajuste del modelo de día en calma de la etapa (212). Además, para la base de datos descrita como etapa (225) se usa un sistema de almacenamiento de datos (43) al que la unidad de control puede acceder en cualquier momento.

Por último, la salida (44) con los datos de perturbación geomagnética de la componente horizontal local puede realizarse a ficheros de texto e imágenes que mantenga la última actualización y, a su vez, a una pantalla que muestre una gráfica con los mismos.

Los expertos en la materia comprobarán las ventajas que se derivan de la invención descrita. La protección de esta invención se realiza al amparo de la descripción realizada, incluyendo los dibujos, y queda reflejada por lo expresado en las siguientes reivindicaciones.

REIVINDICACIONES

1. Procedimiento de obtención de la perturbación geomagnética local (15) a latitudes medias, que comprende las etapas de:

5

a) obtención de la medida de la componente horizontal de campo geomagnético local (11), mediante el tratamiento de los datos originales suministrados por los sensores magnéticos el magnetómetro ubicado en el lugar;

10

b) determinación de una curva de variación diaria (13), que representa la contribución de origen ionosférico de la componente horizontal de campo geomagnético medido en la superficie terrestre;

15

c) determinación de una curva de línea base (14), que representa la contribución de campo magnético asociada al núcleo, corteza y manto terrestres de la componente horizontal de campo geomagnético medido en la superficie terrestre;

20

d) obtención de la perturbación geomagnética local (15) como resultado de eliminar de la componente horizontal del campo geomagnético local medido (11), los valores de la contribución ionosférica (13) y los valores de la contribución del interior de la Tierra (14);

caracterizado por que para la obtención de la curva de variación diaria (13) se analiza, incluso en tiempo real, si se está ante un día en calma o un día perturbado, con el siguiente procedimiento:

25

1) se determina una curva auxiliar de tendencia de los valores de noche (12);

30

2) se sustrae la curva de tendencia de los valores de noche (12) a los valores de la componente horizontal de campo magnético medido (11);

35

3) se ajusta un modelo de día en calma (212) a los datos obtenidos en el paso 2), estando el modelo de día en calma geomagnética definido mediante una curva de spline cúbico con cuatro puntos de control de intensidad variable, que funcionan como parámetros libres y que se encuentran situados con una separación fija entre ellos abarcando todas las horas de día local, y con puntos de control con intensidad de valor cero para las horas de noche local;

40

4) se clasifica, a partir de los valores de la bondad del ajuste realizado en el paso 3) y con los umbrales establecidos según el caso, si los datos pueden catalogarse como los de un día en calma geomagnética o los de un día perturbado;

45

5) se establecen los datos ajustados del modelo de día en calma, para los días clasificados como día en calma, como curva de variación diaria.

50

2. Procedimiento de obtención de la perturbación geomagnética local (15) a latitudes medias, según la reivindicación primera, **caracterizado** por que la contribución del interior de la Tierra (14) se determina mediante un valor promedio de los datos existentes en una base de datos del procedimiento de días clasificados previamente como en calma.

3. Procedimiento de obtención de la perturbación geomagnética local a latitudes medias, según la reivindicación primera o segunda, **caracterizado** por que la curva de variación diaria (13), usada para un día clasificado como perturbado, es la curva de variación diaria del día clasificado como en calma más próximo en el tiempo.

- 5 4. Procedimiento de obtención de la perturbación geomagnética local (15) a latitudes medias, según cualquiera de las reivindicaciones primera a tercera **caracterizado** por que la clasificación de día en calma geomagnética (213) se realiza mediante una valoración de la bondad del ajuste del modelo de día en calma (212) a los datos de la componente horizontal de campo magnético medido (11), una vez sustraídos los datos de la curva auxiliar de tendencia de los valores de noche (12).
- 10 5. Dispositivo de obtención de la perturbación geomagnética local (15) a latitudes medias **caracterizado** por que ejecuta el procedimiento descrito en las reivindicaciones 1 a 4.
- 15 6. Dispositivo de obtención de la perturbación geomagnética local a latitudes medias, según la reivindicación primera, **caracterizado** por que comprende:
- una unidad de entrada de datos (41),
 - una unidad de control y proceso (CPU) (42),
 - una unidad de almacenamiento (43),
 - 20 - una unidad de salida de datos (44).

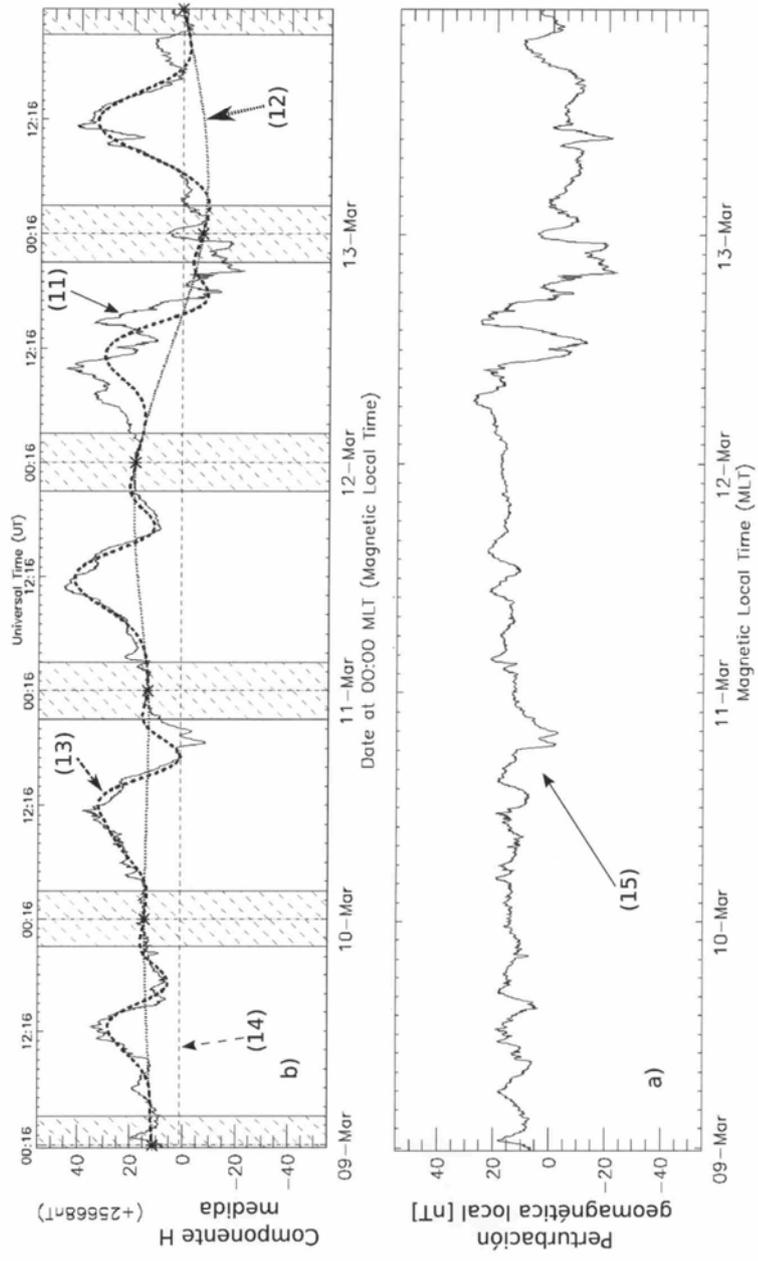


FIG. 1

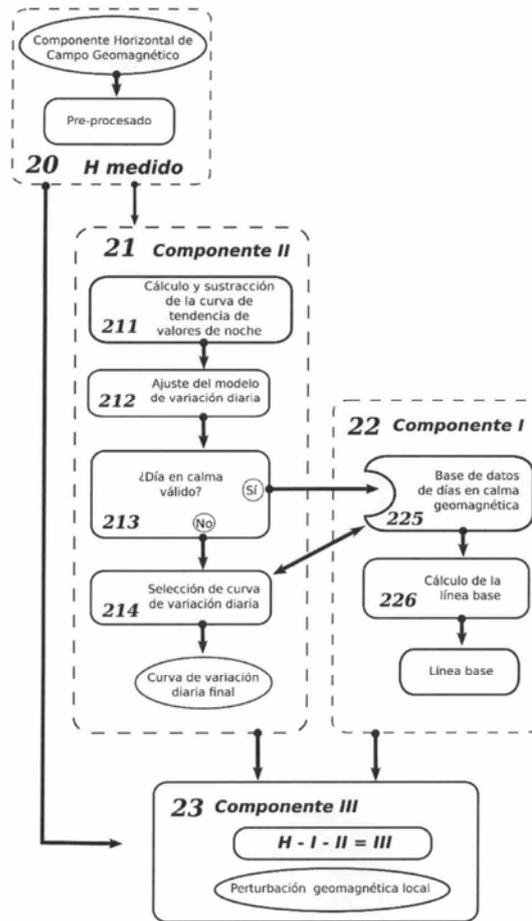


FIG. 2

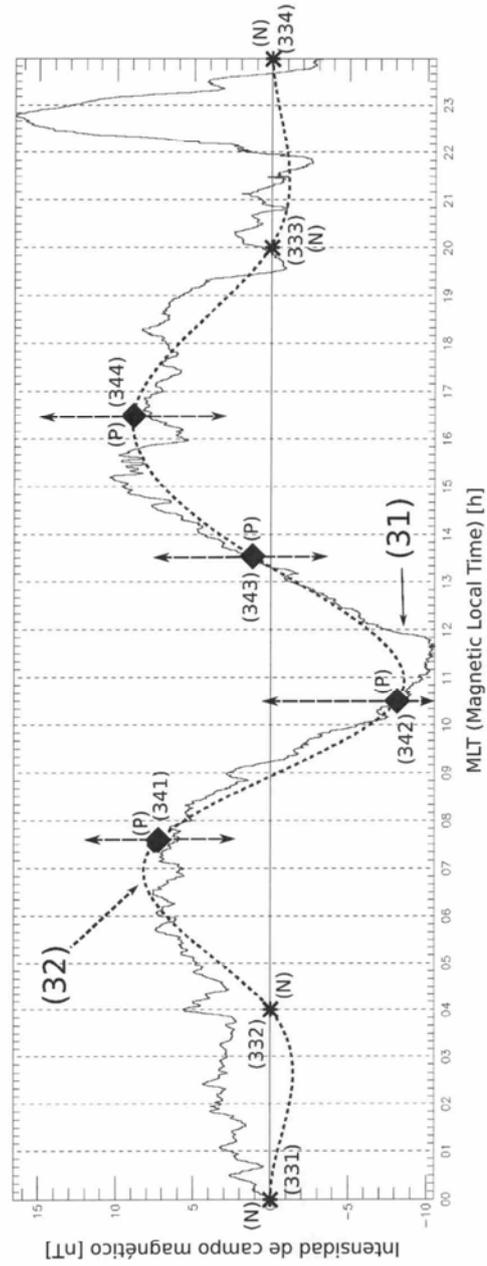


FIG. 3

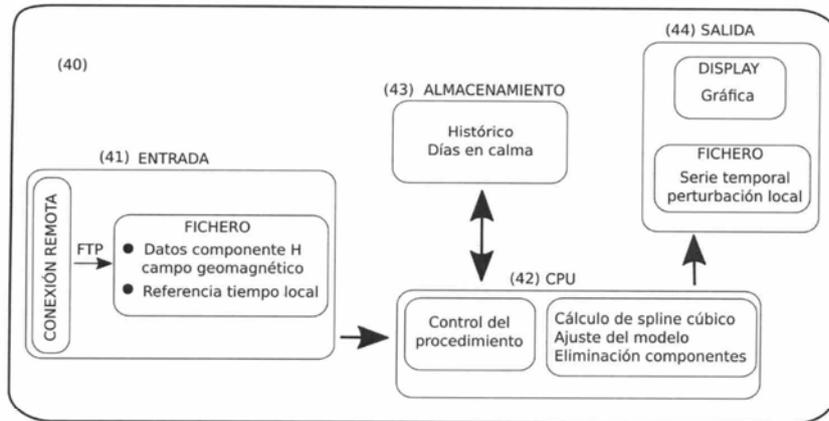


FIG. 4