



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① Número de publicación: **2 341 696**

② Número de solicitud: 200803673

⑤ Int. Cl.:

**G06K 9/00** (2006.01)

**G06T 7/00** (2006.01)

**G01J 3/28** (2006.01)

**G06T 7/40** (2006.01)

**G06F 17/30** (2006.01)

**G01C 11/06** (2006.01)

⑫

PATENTE DE INVENCION

B1

⑫ Fecha de presentación: **23.12.2008**

⑬ Fecha de publicación de la solicitud: **24.06.2010**

Fecha de la concesión: **06.05.2011**

⑮ Fecha de anuncio de la concesión: **18.05.2011**

⑯ Fecha de publicación del folleto de la patente:  
**18.05.2011**

⑰ Titular/es: **Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC)**  
**c/ Serrano, 117**  
**28006 Madrid, ES**

⑱ Inventor/es: **Jiménez Berni, José A.;**  
**Zarco Tejada, Pablo J.;**  
**Fereres Castiel, Elías y**  
**Suárez Barranco, María Dolores**

⑳ Agente: **Pons Ariño, Ángel**

㉑ Título: **Método de caracterización de vegetación.**

㉒ Resumen:

Método de caracterización de vegetación.  
El método objeto de la invención es de utilidad para la determinación de situaciones de estrés hídrico en vegetación. El método está basado en modelos de transferencia radiactiva formados a partir de imágenes térmicas y multiespectrales y su posterior inversión para la obtención de un índice de fotoresistencia química (PRI) teórico a partir del cual se puede determinar la situación de la vegetación comparando el PRI.

ES 2 341 696 B1

Aviso: Se puede realizar consulta prevista por el art. 37.3.8 LP.

## DESCRIPCIÓN

Método de caracterización de vegetación.

### 5 Objeto de la invención

El objeto principal de la presente invención es un método de estimación del PRI (índice de Reflectancia Fotoquímica) teórico correspondiente a situaciones de ausencia de estrés hídrico en vegetación a partir de una simulación con inversión de modelos de simulación generados a partir de datos obtenidos por teledetección, así como su uso combinado con datos de temperatura de la vegetación para identificar estrés hídrico.

### Antecedentes de la invención

La agricultura de precisión nació a finales de los años 80 y principios de los 90 en los EE.UU. Su objetivo es ajustar el uso de recursos agrícolas y métodos de cultivo para adaptarlos a la heterogeneidad presente en el suelo o cultivo. En otras palabras, la agricultura de precisión permite conseguir una mayor rentabilidad, productividad, sostenibilidad, calidad del producto, protección medioambiental, seguridad alimentaria, y finalmente, un mayor desarrollo rural. Para conseguir todos estos objetivos, la agricultura de precisión necesita hacer uso de las llamadas tecnologías de la información y comunicación: sistemas de posicionamiento global (GPS), sistemas de información geográfica (SIG), Teledetección, tecnologías de aplicación de entradas de datos con dosis variable (VRT), etc.

En efecto, la teledetección se ha convertido en uno de los pilares más sólidos sobre los que se sustenta la agricultura de precisión. Así, desde el lanzamiento del primer satélite comercial para la observación de la tierra en 1972, LANDSAT-1, esta ciencia se ha mostrado como una herramienta excelente para monitorizar todos los procesos biofísicos que tienen lugar en nuestro planeta, tanto a una escala global como local.

Los dos principales métodos utilizados para la estimación de variables biofísicas mediante teledetección son: los índices de vegetación y la inversión de modelos de simulación.

El uso de los índices de vegetación es una herramienta eficaz para la determinación de las propiedades de las cubiertas vegetales, puesto que éstos son capaces de aumentar la señal de la vegetación mientras que minimizan los efectos colaterales (e indeseables en la mayoría de los casos) derivados de las condiciones de iluminación y del suelo.

Los índices de vegetación son combinaciones de dos o más bandas que pueden ser calculadas a partir de las salidas del sensor: voltaje, reflectancia o conteos numéricos. Todos son correctos pero cada uno producirá diferentes valores del índice de vegetación para las mismas condiciones de observación. Se considera que los índices de vegetación deben calcularse a partir de la reflectancia con objeto de que los índices puedan ser comparables entre imágenes tomadas en distintas fechas. Esta facilidad de cálculo ha hecho que los índices de vegetación sean ampliamente usados en la actualidad como una herramienta no destructiva para la estimación de variables biofísicas.

Un buen índice debe ser sensible a la variación de la variable estudiada, pero ser resistente (o verse mínimamente afectado) a otros factores como la atmósfera, el suelo, la arquitectura de la cubierta vegetal y la topografía. De acuerdo a los efectos que un índice es capaz de afrontar éste se clasifica en: intrínseco, resistente al suelo o resistente a la atmósfera.

Sin embargo, el uso de estos índices presenta algunos inconvenientes, dado que hasta la fecha ninguno de ellos ha conseguido eliminar completamente las influencias no deseadas. Además, su uso no permite estimar más de una variable al mismo tiempo, la cual ha de ser específicamente calibrada mediante una ecuación empírica cuyos forma matemática y coeficientes son particulares para cada estimación.

En resumen, los índices de vegetación son relaciones empíricas válidas para cada imagen (pues están asociados a sus condiciones de adquisición) y, por tanto, su uso operativo para estimar variables biofísicas no resulta evidente. La inversión de modelos de simulación consiste en ajustar los valores de las variables biofísicas usadas como datos de entrada de los modelos de transferencia radiativa, de tal manera que la reflectancia simulada con ellos se aproxime lo más posible a la medida por el sensor. Estos modelos de simulación de transferencia radiativa simulan, por tanto, la llamada función de reflectancia bidireccional (conocida como BDRF, por sus siglas en inglés), la cual permite el cálculo de la reflectancia de una superficie en función de los ángulos de observación e iluminación, así como de una descripción de las características biofísicas y radiativas de la misma.

La determinación de la reflectancia a través de la BDRF se conoce como “problema directo”, y ha sido tradicionalmente aplicado para validar los modelos de simulación de transferencia radiativa.

Otra ventaja de la inversión física del modelo de simulación es el hecho de poder usar toda la información radiométrica aportada por el sensor multispectral; contrariamente a los índices de vegetación que fundamentalmente usan solamente dos bandas (rojo e infrarrojo cercano). La información contenida en las diferentes bandas de un sensor nunca está completamente correlada y, por tanto, el uso de toda la información espectral aporta información adicional. Finalmente, pero no menos importante, este método permite trabajar con la información direccional proporcionada por la mayoría de los nuevos sensores.

Este tipo de estudios presenta varios problemas debido a la diversidad existente entre los diferentes cultivos o la determinación de los parámetros necesarios para la realización del estudio. También hay que tener en cuenta la diferencia que se puede encontrar entre los índices tomados a nivel foliar o en las capas superiores (dosel o cubierta) de la vegetación. La resolución requerida para este tipo de estudios representa otro inconveniente, ya que se necesita de técnicas de adquisición de imágenes con una alta resolución espacial y espectral, y con la calidad necesaria para obtener los índices necesarios.

### Descripción de la invención

El objeto de esta invención es un método para la determinación del índice teórico del estrés hídrico en vegetación mediante la estimación de temperatura de la vegetación, así como de la simulación y mediante la utilización de modelos de simulación de transferencia radiativa y su inversión. Esto significa que para un determinado cultivo se realiza, mediante cámaras específicas tales como cámaras térmicas o multispectrales, una captura de imágenes térmicas y espectrales que son unidas a modo de mosaico para generar una escena o imagen total a partir de la cual se extraen los índices de reflectancia medios que se usan como datos de entrada en modelos de transferencia radiativa; a partir de estos índices de reflectancia se obtienen parámetros biofísicos tales como el índice de contenido clorofílico Cab (contenido clorofílico), índices de área foliar LAI (Leaf Area Index o índice foliar) y a partir de las imágenes térmicas captadas se obtiene la temperatura de la vegetación.

A partir de estos índices que son utilizados como datos de entrada en modelos de transferencia radiativa y mediante inversión de estos modelos, se obtiene un PRI (índice de reflectancia fotoquímica en sus siglas en inglés Photochemical Resistance Index) teórico denominado sPRI a partir del cual se puede trazar una línea base que delimitaría las zonas de presencia o ausencia de estrés hídrico. Una vez obtenido esto, resulta fácil determinar la situación de estrés hídrico de una plantación o cultivo mediante la comparación del PRI que se obtenga de dicha vegetación con el sPRI determinado anteriormente mediante inversión de modelos de transferencia radiativa.

Para ello se realiza una teleobservación o teledetección con cámaras térmicas y cámaras multispectrales de banda estrecha que serán las encargadas de la adquisición de imágenes espectrales y térmicas que se utilizarán para confeccionar el modelo. Las cámaras utilizadas en este método son dos tipos, por una parte de tipo multispectral de 6 bandas, mientras que las imágenes térmicas son capturadas mediante cámaras térmicas.

La cámara multispectral comprende 6 sensores de imagen con filtros de paso de 10nm calibrados radiométricamente en laboratorio. Los parámetros de la cámara multispectral se obtienen mediante el método de calibración de Bouguet; mediante este método se consigue recuperar los parámetros intrínsecos de la cámara, tales como: distancia focal, coordenadas de los puntos principales y la distorsión radial de las lentes. Para este último parámetro se utiliza un modelo de simulación basado en el modelo de simulación de Wolf, mediante el cual se puede estimar tanto la distorsión radial como la tangencial, aunque en el caso de este método sólo se hace necesario tener en cuenta ésta última.

Para la utilización de estas imágenes adquiridas se hace necesario el uso de una georeferenciación, sin estos datos tenemos imágenes de las que no sabemos a qué lugar o posición geográfica corresponden, para ello se utiliza un sistema de triangulación aérea haciendo uso del sistema Leica LPS.

En cuanto a la cámara encargada de la adquisición de imágenes térmicas, ésta se calibra en laboratorio utilizando un cuerpo negro y estabilizándola antes de realizar las capturas. La cámara lleva incorporado un sensor FPA con un rango espectral de 7.5 -13  $\mu\text{m}$  y permite trabajar en un rango de 233-393K; el sensor lleva implementado dos calibraciones internas: una referida a la calibración de la temperatura interna y la otra es una calibración de corrección de no uniformidad (NUC).

A partir de las imágenes térmicas obtenidas, y mediante diversos métodos basados en modelos de transferencia radiativa e inversión de los mismos se llega a la determinación del PRI teórico en situaciones de ausencia de estrés hídrico para el cultivo o parte del cultivo estudiado. Este PRI teórico obtenido determina el valor considerado como línea base para la determinación del estrés hídrico siendo por tanto posible la estimación de situación de estrés hídrico de una plantación o cultivo mediante la obtención *in-situ* del PRI de dicho cultivo y su comparación con el sPRI o PRI teórico mediante este método.

Para este tipo de estudios se utilizan diferentes modelos de transferencia radiativa dependiendo de la estructura y características propias de la vegetación a estudiar. Es de uso común la utilización de modelos de transferencia radiativa tipo PROSPECT, que simula la reflectividad/transmisividad de una hoja, y tipo SAILH que simula la reflectividad del dosel o parte alta de la vegetación; estos modelos de simulación pueden ir vinculados a diferentes modelos de simulación SAIL, FLIGHT dependiendo del tipo de cultivo a estudiar y de los niveles de hoja o cubierta a estudiar.

Para la inversión de modelos de transferencia radiativa se hace uso de un modelo transferencia radiativa PROSPECT conectado a un modelo de transferencia radiativa FLIGHT (3D Forest Light Interaction Model), el cual está basado en el método Montecarlo de "ray tracing" (MCRT), éste es un modelo que hace referencia a la interacción entre la luz y la vegetación. Mediante esta herramienta se realiza un modelo de transferencia radiativa para la estructura de la capa superior de la vegetación. Para este estudio se utiliza el modelo de transferencia radiativa FLIGHT junto

## ES 2 341 696 B1

con el modelo de transferencia radiativa PROSPECT. Los resultados buscados se obtienen mediante una inversión del modelo PROSPECT-FLIGHT basada en tablas independientes para cada cultivo y condiciones de adquisición de imagen. El método de inversión del modelo de simulación se basa en la inversión de la pareja de modelo de simulación “hojas-capa superior” para los valores de Cab (contenido clorofílico) y LAI (Leaf Area Index o índice foliar).  
5 La inversión del modelo de simulación se realiza manteniendo fijo el parámetro estructural (N), el contenido de agua (Cw) y el la cantidad de materia seca (Cm), obtenidos todos ellos de la literatura específica publicada para cada tipo de cultivo (en este caso Kempeneers *et al.* para árboles melocotoneros y Zarco-Tejada *et al.* para olivos), mientras que se permiten variaciones en los valores relacionados con el Cab (contenido clorofílico) y LAI (Leaf Area Index o índice foliar) tanto a nivel de hoja como en las capas superiores o dosel. El resto de parámetros se mantienen fijos siendo característicos para cada cultivo y basados en los datos representativos de la plantación, obteniendo como  
10 resultado una LUT (tabla de resultados denominada por sus siglas Look Up Table en inglés) simulado para cada cultivo.

Una vez finalizado el proceso anterior se obtiene un PRI teórico o simulado, denominado sPRI; a partir de cual se establece una línea base que determina el límite para la situación de estrés hídrico de un determinado cultivo. Mediante la comparación directa del PRI del cultivo en cuestión con el sPRI obtenido se determina si ese cultivo está sometido a estrés hídrico o no. Adicionalmente, la relación del PRI real con la temperatura de cada elemento de vegetación permite demostrar la conexión existente entre el estrés hídrico detectado por el PRI y el nivel de transpiración de la  
15 vegetación que afecta a su temperatura.

### 20 Realización preferente de la invención

Se realiza un estudio sobre una plantación de melocotones (*Prunus persica*). Para la realización de este estudio se regaron distintas zonas del cultivo con distintos aportes hídricos, en concreto 6 líneas de 30 árboles melocotoneros  
25 cada una. Todas las zonas de estudio se regaron mediante sistema de riego por goteo, una de ellas recibiendo el 100% de la tasa de ET (evapotranspiración) calculada para este cultivo (zona de no estrés hídrico), mientras que otra zona se sometió a un Riego Deficitario Controlado (RDI), recibiendo el 80% de la ET. Esta fase de RDI tuvo lugar durante la fase de desarrollo del fruto, que más tarde se volvió a regar por encima de la ET hasta recuperar el nivel hídrico del árbol sin estrés hídrico. Durante este estudio se realiza una adquisición de imágenes a una resolución muy alta (15 cm  
30 de píxel), estas imágenes son de tipo térmico y multiespectral de banda estrecha. La captura se realiza mediante varias cámaras, con posterior calibración, corrección atmosférica, y calibración geométrica de las imágenes obtenidas para extraer la información radiométrica necesaria.

Una vez terminada la captura se obtienen las imágenes en formato digital adquiridas por los sensores multiespectrales y térmicos.  
35

Las imágenes captadas son llevadas al laboratorio donde comienza el proceso de calibración y corrección de las imágenes y se calibran las imágenes radiométricamente aplicando coeficientes de calibración generados previamente en laboratorio con instrumentos de calibración. Seguidamente se procede a la corrección atmosférica de las imágenes  
40 mediante modelo de simulación atmosférico y datos medidos en campo de espesor óptico en el momento de realización de las capturas. Posteriormente se realiza una corrección geométrica y se generan mosaicos uniendo todas las imágenes tomadas por las cámaras.

Una vez realizado el pegado de las imágenes a modo de mosaico, se aplica el modelo de simulación basados en la pareja basada en el índice de reflectancia en absorción de clorofila transformada TCARI (Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index)/y el índice de vegetación OSAVI (Optimised Soil Adjusted Vegetation Index en sus siglas en inglés) para la estimación de contenido clorofílico. A su vez se utilizan modelos de simulación basados en índice de reflectancia NDVI (índice diferencial de vegetación normalizado, también conocido como NDVI - Normalized Difference Vegetation Index por sus siglas en inglés, es un índice usado para estimar la cantidad, calidad y desarrollo  
50 de la vegetación) para la estimación de índice de área foliar; a continuación se aplican modelos de simulación basados en térmico para estimación de temperatura de la vegetación.

En el caso del índice PRI, el proceso es el siguiente:

- 55 • Se identifican píxeles puros de vegetación.
- Se calcula la media de la reflectancia para la escena completa.
- 60 • Se utiliza el espectro medio como entrada al modelo de simulación de transferencia radiativa para su inversión, utilizando datos de entrada para todos sus parámetros excepto para los foliares N y clorofila a+b, y de cubierta LAI.
- Se invierte el modelo de simulación a partir de dicho espectro medio de la escena tomado con la cámara multiespectral (del que se calcula PRI), y se obtiene mediante inversión el espectro teórico para condiciones de  
65 no estrés (del que se calcula sPRI).
- La línea base sPRI definirá la región espectral por encima de la cuál se considera que habrá estrés.

## ES 2 341 696 B1

- Se extrae la reflectancia de cada copa de la imagen tomada por la cámara multiespectral, y se calcula el PRI de dicho árbol. Se compara sistemáticamente sPRI (modelizado, no estrés) con el PRI de cada árbol extraído de la imagen. Si  $PRI > sPRI$  se considera que dicha vegetación (árbol) está estresada.

5 Para PRI, y los productos de clorofila, LAI, y temperatura se generan “clases de estrés”, en concreto bajo, medio y alto estrés, por lo tanto cartografiando el estado de estrés de la vegetación a partir de las imágenes multiespectrales y térmicas.

10

15

20

25

30

35

40

45

50

55

60

65

## REIVINDICACIONES

1. Método de caracterización de vegetación que hace uso de:

- una cámara multiespectral encargada de tomar imágenes multiespectrales, y
- una cámara térmica encargada de tomar imágenes térmicas

**caracterizado** porque comprende las siguientes fases:

- captar imágenes térmicas mediante la cámara térmica y captar imágenes de banda estrecha de la vegetación mediante la cámara multiespectral,
- calibrar y corregir las imágenes captadas,
- generar un mosaico a partir de todas las imágenes captadas,
- obtener el índice clorofílico de la vegetación a partir de índice TCARI/OSAVI,
- obtener el índice foliar de la vegetación a partir de índice NDVI,
- obtener la temperatura de la vegetación a partir de las imágenes térmicas, y
- obtener el índice PRI teórico de la vegetación.

2. Método de caracterización de vegetación según reivindicación 1 **caracterizado** porque la fase de calibración y corrección comprende:

- realizar una calibración radiométrica de las imágenes de banda estrecha captadas,
- realizar una corrección atmosférica de las imágenes térmicas mediante un modelo de simulación atmosférico y datos medidos en campo de espesor óptico, y
- realizar una corrección geométrica.

3. Método de caracterización de vegetación según reivindicación 1 **caracterizado** porque la fase de obtención del índice PRI teórico de no estrés hídrico comprende las siguientes fases:

- identificar los píxeles puros de vegetación,
- calcular la media de la reflectancia para el mosaico completo generado a partir de las imágenes captadas por la cámara multiespectral,
- introducción de los datos en un modelo de transferencia radiativa,
- realizar la inversión del modelo de transferencia radiativa basándose en la inversión de la pareja “hojas-capas superior” para los valores de Cab y LAI manteniendo fijo el parámetro estructural (N), el contenido hídrico (Cw) y el la cantidad de materia seca (Cm), específicos de cada vegetación,
- obtener el espectro teórico para condiciones de no estrés a partir del resultado de la inversión del modelo realizada en el paso anterior,
- obtener el sPRI que es el índice PRI de no estrés modelizado a partir del espectro teórico obtenido en el paso anterior,
- definir una línea base sPRI que delimita la región espectral por encima de la cuál se considera que hay estrés,
- extraer la reflectancia de cada copa de la imagen tomada por la cámara multiespectral (2),
- calcular el PRI de la vegetación captada, y
- comparar el PRI obtenido en el paso anterior con el sPRI obtenido anteriormente.

4. Método de caracterización de vegetación según reivindicación 3 **caracterizado** porque la caracterización de la vegetación viene dada por la comparación sistemática del sPRI (modelizado, no estrés) con el PRI de cada árbol extraído de la imagen, en el que si el  $PRI > sPRI$  se considera que dicha vegetación está hídricamente estresada.



OFICINA ESPAÑOLA DE  
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA

① ES 2 341 696

② N° de solicitud: 200803673

③ Fecha de presentación de la solicitud: 23.12.2008

④ Fecha de prioridad:

## INFORME SOBRE EL ESTADO DE LA TÉCNICA

⑤ Int. Cl.: Ver hoja adicional

### DOCUMENTOS RELEVANTES

Categoría	⑥ Documentos citados	Reivindicaciones afectadas
A	WO 0133505 A2 (MONSANTO CO; MCGUIRE JOHN DENNIS; PEARSON RANDALL SCOTT) 10.05.2001	1
A	US 7068816 B1 (KNOBLAUCH et al.) 27.06.2006	1
A	US 5187754 A (CURRIN et al.) 16.02.1993	1
A	US 6567537 B1 (ANDERSON et al.) 20.05.2003	1

#### Categoría de los documentos citados

X: de particular relevancia

Y: de particular relevancia combinado con otro/s de la misma categoría

A: refleja el estado de la técnica

O: referido a divulgación no escrita

P: publicado entre la fecha de prioridad y la de presentación de la solicitud

E: documento anterior, pero publicado después de la fecha de presentación de la solicitud

#### El presente informe ha sido realizado

para todas las reivindicaciones

para las reivindicaciones nº:

Fecha de realización del informe

27.04.2010

Examinador

Mª C. González Vasserot

Página

1/4

CLASIFICACIÓN DEL OBJETO DE LA SOLICITUD

**G06K 9/00** (2006.01)

**G06T 7/00** (2006.01)

**G01J 3/28** (2006.01)

**G06T 7/40** (2006.01)

**G06F 17/30** (2006.01)

**G01C 11/06** (2006.01)

Documentación mínima buscada (sistema de clasificación seguido de los símbolos de clasificación)

G06K, G06T, G01J, G06F, G01C

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

INVENES, EPODOC, WPI



Fecha de Realización de la Opinión Escrita: 27.04.2010

**Declaración**

<b>Novedad (Art. 6.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-4	<b>SÍ</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>
<b>Actividad inventiva (Art. 8.1 LP 11/1986)</b>	Reivindicaciones 1-4	<b>SÍ</b>
	Reivindicaciones	<b>NO</b>

Se considera que la solicitud cumple con el requisito de **aplicación industrial**. Este requisito fue evaluado durante la fase de examen formal y técnico de la solicitud (Artículo 31.2 Ley 11/1986).

**Base de la Opinión:**

La presente opinión se ha realizado sobre la base de la solicitud de patente tal y como ha sido publicada.

**1. Documentos considerados:**

A continuación se relacionan los documentos pertenecientes al estado de la técnica tomados en consideración para la realización de esta opinión.

Documento	Número Publicación o Identificación	Fecha Publicación
D01	WO 0133505 A2	10-05-2001
D02	US 7068816 B1	27-06-2006
D03	US 5187754 A	16-02-1993
D04	US 6567537 B1	20-05-2003

**2. Declaración motivada según los artículos 29.6 y 29.7 del Reglamento de ejecución de la Ley 11/1986, de 20 de marzo, de patentes sobre la novedad y la actividad inventiva; citas y explicaciones en apoyo de esta declaración**

Los documentos citados sólo muestran el estado general de la técnica y no se consideran de particular relevancia.

Ninguno de los documentos anteriores muestra un método de caracterización de vegetación como se reivindican en las reivindicaciones 1-4.

Además, no se considera obvio que un experto en la materia conciba dicho procedimiento reivindicado en estas reivindicaciones.

El documento D1 se considera el más cercano al Estado de la Técnica, se diferencia de la solicitud en que no existe la etapa de generar un mosaico a partir de las imágenes captadas por la cámara térmica y la cámara multiespectral.

Por lo tanto, la invención reivindicada es nueva e implica actividad inventiva.