

19



OFICINA ESPAÑOLA DE
PATENTES Y MARCAS

ESPAÑA



11 Número de publicación: **1 140 633**

21 Número de solicitud: 201500334

51 Int. Cl.:

G01W 1/12 (2006.01) **G01P 5/08** (2006.01)
G01J 1/02 (2006.01)
G01P 15/08 (2006.01)
G01C 17/30 (2006.01)

12

SOLICITUD DE MODELO DE UTILIDAD

U

22 Fecha de presentación:

08.05.2012

43 Fecha de publicación de la solicitud:

30.06.2015

71 Solicitantes:

**UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
(100.0%)
Avda. Séneca 2
28040 Madrid ES**

72 Inventor/es:

**BALAGUER NUÑEZ, Luis;
ESCRIBANO ROCAFORT, Adrián G.;
VENTRE LESPIAUQC, Agustina B.;
GRANADO YELA, Carlos;
DELGADO SÁEZ, Juan Antonio;
LÓPEZ PINTOR, Antonio;
MUÑOZ VELÁZQUEZ, Vicente;
MARTÍNEZ DÍAZ, Félix y
DORADO MARTÍN, Gabriel**

74 Agente/Representante:

PLUMET ORTEGA, Joaquín

54 Título: **Sistema para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol**

ES 1 140 633 U

DESCRIPCIÓN

Sistema para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol

SECTOR DE LA TÉCNICA

5

La invención se encuadra en el sector agroforestal, más concretamente en el de la agrimensura y de la investigación.

ESTADO DE LA TÉCNICA

10

Las técnicas disponibles para determinar el área expuesta al sol de una hoja se limitan a técnicas manuales: la medida de la superficie de la hoja con un calibre, la pendiente con un clinómetro y su orientación con la brújula. Su precisión es muy baja, están sujetas a los errores durante el largo y rutinario proceso de toma de datos y además sólo permiten tomar un reducido número de datos por día, lo cual limita la capacidad de extrapolar los resultados obtenidos a partir de un reducido tamaño muestral al conjunto del elevadísimo número de hojas que conforman la copa del árbol.

15

20

La alternativa es utilizar técnicas más precisas como escáneres láser o digitalizadores. Sin embargo, aunque la medida en estos casos no es tan tediosa y es mucho más precisa, su aplicación se ve severamente limitada.

25

En el caso de escáneres láser terrestres 3D, diseñados para levantamientos topográficos por su escasa portabilidad y autonomía, su resolución permite individualizar las hojas pero no en condiciones de campo o difícilmente. El proceso de escaneado se ve seriamente influido por el movimiento del objeto a escanear y en el caso de las hojas una ligera brisa las mueve, haciendo que, o bien salgan repeticiones de la hojas, o bien, que no salgan escaneadas.

30

Para el caso de digitalizadores 3D la limitación viene de la dependencia de sensores fijos y de una fuente de alimentación voluminosa y pesada.

5 Por otro lado los modelos matemáticos conocidos en la actualidad sólo permiten simulaciones puntuales de la trayectoria solar y la exposición foliar.

Para evaluar la actividad de un elevado número de hojas en la copa de un árbol se plantea el problema de superar el nivel de análisis de órgano (hoja) para escalar al nivel de individuo (copa de un árbol real). El tiempo resulta un
10 factor limitante a la hora de abarcar un número elevado de réplicas debido a la laboriosidad de los métodos tradicionales.

La metodología planteada tiene como objeto calcular el porcentaje de área de la hoja vista por el sol -*Silhouette Area of Leaf blade (SAL)*- en un momento
15 determinado mientras que otras patentes relacionadas se centran en otras variables de la vegetación: el índice de superficie foliar -*Leaf Area Index (LAI)*- en la patente JP2007171033; el índice de reflexión fotoquímica -*Photochemical Reflectance Index (PRI)*- y el índice normalizado de diferencias de vegetación -*Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)*-
20 en la patente WO2009136210 y a una escala mayor que la del individuo.

Para el cálculo de esta variable se obtienen medidas de los ángulos foliares de manera directa mediante el dispositivo y posteriormente se procede al cálculo de *SAL* a través de una ecuación trigonométrica (Granado-Yela, C. et
25 al. *Plant Cell and Environment*, **34**(5):800-10)

La invención supone una toma de datos manual mediante un dispositivo inalámbrico mientras que otras invenciones recurren a técnicas de detección remotas montadas sobre un vehículo (avión, satélite, automóvil) o una
30 plataforma, como en WO2009136210 o en DE102005030451. Estas patentes se sirven de pulsos *LASER* para estimar la distribución de ángulos en el dosel

arbóreo mientras que la invención planteada utiliza sensores piezoeléctricos *in situ*.

La metodología aporta información a nivel de hoja extrapolable a nivel
5 individuo y es complementaria a la medición de variables ambientales mediante otras técnicas (fotografía hemisférica) como las que presenta la patente JP2007171033.

El invento que se propone es el único método que en la actualidad permite,
10 con una sola pulsación en un dispositivo, determinar la posición de cada hoja y, en consecuencia, obtener datos precisos de miles de hojas en muy poco tiempo, que constituirán una población de hojas suficientemente representativa del conjunto de la copa de un árbol adulto.

15 La invención resulta una alternativa más económica que las anteriores y combina la portabilidad, el manejo y la autonomía de los métodos tradicionales con la precisión de la tecnología digital. Además se presenta el cálculo de la exposición potencial de cada hoja y la predicción de la misma como novedad.

20 La precisión del procedimiento ha sido evaluada a lo largo de un proceso de calibración y de resolución de problemas instrumentales y topológicos.

EXPLICACIÓN DE LA INVENCION

25 La invención trata de un sistema desarrollado y calibrado para calcular áreas foliares potencialmente expuestas al sol mediante la determinación de la posición relativa de las hojas respecto al campo gravitatorio, cabeceo α y alabeo y respecto a la horizontal, y al campo magnético terrestre, rumbo β y azimut δ respecto al norte magnético.

30

El invento que se propone es el único método que en la actualidad permite, con una sola pulsación en un dispositivo móvil (1), determinar la posición de

cada hoja (14) y, en consecuencia, obtener datos precisos de miles de hojas en muy poco tiempo, que constituirán una población de hojas suficientemente representativa del conjunto de la copa de un árbol adulto.

- 5 El sistema permite además la simulación simultánea de grupos de hojas de exposición complementaria en diferentes momentos del año y a distintas latitudes, relevantes en sentido biológico debido a las características de la forma y la órbita terrestre. Estas variables permiten abordar el estudio del funcionamiento de organismos modulares tan complejos como los árboles
10 desde una nueva perspectiva más funcional y más dinámica.

- Con un dispositivo móvil (1) se determinan los ángulos de posición, medidos en grados, de la lámina foliar (14) al integrar las medidas de un acelerómetro y un magnetómetro presentes como sensores, entre otros, del dispositivo.
15 Éste puede ser un teléfono móvil, una tableta (*tablet*) o cualquier dispositivo que incorpore los sensores mencionados.

- En una realización preferente se utiliza un dispositivo que incorpore un giróscopo además de los sensores mencionados, que combinado con el
20 acelerómetro, mejora la precisión.

En una forma aún más particular el dispositivo móvil es un teléfono móvil tipo “*smartphone*”, que sí incorpora un giróscopo.

- 25 Estos datos se van almacenando en la memoria del dispositivo, en formato tabla de datos.

- El fichero se envía a un equipo informático, por cualquier método que permita la transferencia de datos entre dispositivos como un cable USB, una tarjeta
30 microSD o SD, por sistemas *bluetooth* o por Internet, si ambos dispositivos están alejados geográficamente.

Este equipo informático está dotado de software (Excell, Stella, por ejemplo) que permite realizar el cálculo de la ecuación trigonométrica para calcular SAL a través de las operaciones matemáticas presentes en la ecuación. Para ello se utilizan diferentes modelos, desarrollados específicamente para este sistema y basados en la dinámica de sistemas, integran otras variables geográficas de latitud, longitud terrestres y uso horario, para calcular la exposición potencial de la hoja a la radiación solar a lo largo de un periodo de tiempo (varios días, estaciones) y para una hora puntual, así como para determinar el momento en el que cada hoja alcanza la máxima exposición al sol.

La calibración del software se lleva a cabo mediante un soporte regulable (fig. 3) diseñado para tal fin, y que también se quiere proteger, al que se acopló un digitalizador 3D como referencia para determinar la bondad de ajuste de las medidas. El digitalizador 3D es un aparato formado por un generador de campo electromagnético y un receptor/sensor que permite calcular la posición y la orientación de éste último en el espacio, así como la variación en posición/orientación respecto a una posición anterior. El aparato es capaz de realizar medidas dinámicas y a tiempo real de la situación del receptor en un sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) y de orientación (azimut, elevación y giro/alabeo). El sistema ofrece la captura de movimiento con seis grados de libertad virtualmente sin latencia.

La validación del método en campo se llevó a cabo mediante métodos manuales (clisímetro y brújula).

El sistema desarrollado combina la portabilidad, el manejo y la autonomía de los métodos tradicionales con la precisión de la tecnología digital. El uso de sensores incluidos en los dispositivos así como la calibración del software empleado permite tener medidas de alta precisión.

Además las baterías recargables comúnmente usadas en los dispositivos y los pocos recursos que consume el software desarrollado proporcionan una alta autonomía.

- 5 El software desarrollado permite con una pulsación del teclado la toma de las variables relevantes incrementando la velocidad de muestreo y realizándolo en un corto espacio de tiempo.

- 10 El empleo de varios dispositivos dispara el número de muestras que se pueden obtener en un tiempo reducido, siendo a la vez, por definición, altamente portátiles y manejables lo que también permite muestrear en lugares poco accesibles.

- 15 El sensor que se utiliza para medir la aceleración, y por tanto el vector de la gravedad respecto a los ejes de referencia del dispositivo, es un acelerómetro de tres ejes microelectromecánico. El movimiento de una pequeña masa es traducido en tensión mediante unos sensores piezoeléctricos para obtener la aceleración.

- 20 De la misma manera se utiliza una brújula electrónica o magnetómetro integrado en un pequeño circuito que es capaz de medir el campo magnético en Gauss en cada uno de los 3 ejes de coordenadas XYZ del dispositivo móvil (1) (fig. 1).

- 25 Los valores medidos instantáneamente, tanto de la aceleración como del campo magnético, varían rápidamente por la sensibilidad de los sensores, por lo que se realiza una media de dichos valores, para que su variación sea más suave. En el caso de la aceleración se hace la media de las últimas cien medidas, mientras que para el campo magnético se hace la media de las
30 últimas veinticinco medidas.

La posición relativa del dispositivo móvil respecto al campo gravitatorio se calcula mediante el cabeceo α y el alabeo γ . Se definen estos dos ángulos en el espacio (fig. 2):

- el *cabeceo* α como el ángulo que forma el plano del dispositivo con el eje vertical Z, medido en el intervalo $[-180^\circ, 180^\circ]$ y donde 0° significa un plano vertical y 90° uno horizontal;
- el *alabeo* γ como el ángulo que forma el plano del dispositivo con el eje longitudinal de cabeceo, medido en el intervalo $[-180^\circ, 180^\circ]$ y donde 0° significa que el plano es horizontal sobre el eje de cabeceo, $\pm 180^\circ$ significa que la parte anterior y posterior están invertidas y $\pm 90^\circ$ significa que está vertical.

Estos ángulos se obtienen proyectando el vector gravedad (g) en los ejes XYZ y calculando el ángulo entre las proyecciones sobre el eje X y el eje Z y entre las proyecciones sobre el eje Z y el eje Y, para el *cabeceo* α y el *alabeo* γ respectivamente:

$$\alpha = \arctg (g_x / g_z)$$

$$\gamma = \arctg (g_z / g_y)$$

- La orientación respecto al norte magnético de la cara anterior del dispositivo y de la parte distal al teclado se calcula respectivamente mediante el *azimut* δ y el *rumbo* β (fig. 2).

El *azimut* δ es el ángulo que forma la proyección del vector normal al plano horizontal, medida desde el norte, en sentido horario y se mide en el intervalo $[0^\circ, 360^\circ]$. El *rumbo* β el ángulo que forma la proyección del eje de cabeceo sobre la horizontal con el norte, en sentido horario y se mide en el intervalo $[0^\circ, 360^\circ]$. Estos ángulos se obtienen de la manera siguiente.

- La proyección del eje positivo Z (k) sobre el plano normal a g para el *azimut* δ :

$$P_z = (g \cdot k) \cdot g$$

La proyección del eje positivo Y (j) sobre el plano normal a g para el *rumbo* β :

$$P_y = (g^*j)^*g$$

La proyección de M (campo magnético) sobre el plano normal a g (vector
5 gravedad):

$$Q = (g^*M)^*g$$

La función arcoseno del cociente del producto escalar y vectorial de los
vectores (P_z-Q , P_y-Q) nos proporciona los valores de estos ángulos,
10 quedando definidos por:

$$\delta = \arcsen (|P_z \times Q| / |P_z| \cdot |Q|)$$

$$\beta = \arcsen (|P_y \times Q| / |P_y| \cdot |Q|)$$

El dispositivo móvil determina matemáticamente un triedro en el espacio:
15

$$\begin{pmatrix} \text{sen}(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \text{sen}(\gamma) \cos(\beta) - \cos(\gamma) \text{sen}(\beta) & -\cos(\alpha) \cos(\gamma) \cos(\beta) - \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\beta) \\ \text{sen}(\alpha) \cos(\beta) & \cos(\alpha) \text{sen}(\gamma) \text{sen}(\beta) + \cos(\gamma) \cos(\beta) & -\cos(\alpha) \cos(\gamma) \text{sen}(\beta) + \text{sen}(\gamma) \cos(\beta) \\ \cos(\alpha) & -\text{sen}(\alpha) \text{sen}(\gamma) & \text{sen}(\alpha) \cos(\gamma) \end{pmatrix}$$

La primera columna es el vector que indica la dirección y sentido de la parte
apical de la hoja (*rumbo* β). De las dos primeras columnas se obtiene el plano
20 de la hoja (*cabeceo* α y *alabeo* γ). La tercera columna que complementa el
triedro es el vector normal al plano de la hoja (*azimut* δ).

Las etapas principales del sistema planteado son:

1. Calibración del funcionamiento del dispositivo móvil mediante un
25 digitalizador 3D y el soporte (2) diseñado para este fin.
2. Verificación de la validez de las medidas a tomar en el árbol seleccionado.
3. Toma de datos y registro mediante el dispositivo (1) sobre las hojas de un
árbol seleccionado.
4. Volcado de los datos a un ordenador.

5. Simulación del área foliar potencial expuesta al sol para cada hoja y los posibles grupos de hojas mediante el modelo creado con software informático, en distintas latitudes y en distintas épocas del año.

6. Elaboración de predicciones e hipótesis.

5

El dispositivo móvil (1) actúa como si se tratase de un vector con una parte proximal, una distal, una cara anterior y otra posterior (15). Con esta configuración del dispositivo se hace coincidir el extremo distal al teclado del dispositivo con la parte apical de la hoja, el extremo proximal del teclado del dispositivo con la parte basal (próxima al peciolo) de la hoja y con orientación de la superficie de la pantalla del dispositivo en el mismo sentido que el haz (16) o cara anterior de la hoja. La colocación del dispositivo en posición paralela a una hoja de un árbol, que forme un único plano o que estén en planos paralelos, permite registrar los valores de estos ángulos en la hoja (fig. 6, a y b).

15

Para la calibración del software, llevada a cabo en laboratorio, se ha diseñado un soporte (2) regulable fabricado en un material rígido (fig. 3) sin piezas metálicas, para asegurar que no se produzcan interferencias con el digitalizador 3D o con el dispositivo.

20

En una forma más particular el soporte se fabrica en un plástico tipo PVC. En otras formas particulares puede fabricarse en madera o en vidrio.

El soporte (2) se apoya sobre una pequeña tabla (3), que actúa como un plano, y a la que está unido mediante una clavija de inserción (10) que le permite girar libremente (11) sobre el plano de la tabla y paralelo a ella. La clavija de inserción es una clavija que permite la unión del soporte en el que descansa el teléfono sobre la tabla a la vez que permite girar libremente el soporte sobre el plano de la misma tabla.

30

Esta tabla (3) está adosada a un trípode (5) para sustentarla y se regula por dos tornillos: el tornillo "cabeceador" (8), que permite el cabeceo (13) sobre el eje Norte-Sur en el panel regulable, y el tornillo "alabeador" (9) que permite, a su vez, el alabeo sobre el eje Este-Oeste (12) del panel (fig. 4).

5

La tabla presenta grabada una circunferencia (4), un anclaje (7) para colocar el digitalizador 3D ajustado por dos tornillos (6).

El soporte diseñado actúa como plano, similar al de la hoja, con el que se realizan treinta y seis medidas, una medida por cada diez grados en la circunferencia grabada. La posición del plano queda determinada mediante un digitalizador 3D.

Con este calibrador se realizan medidas con un incremento en el alabeo o en el cabeceo de 5° de elevación sobre la horizontal, entre los 0° y los 85°, con objeto de calcular las diferencias entre las medidas obtenidas y las esperadas mediante el uso de trigonometría.

Definimos los siguientes ángulos para calcular los resultados esperados para cada ángulo α_r , β_r , γ_r , δ_r . El ángulo de elevación de la superficie plana se denomina *elevación* μ comprendido entre $[0^\circ, 90^\circ]$ mientras que los sectores de la circunferencia inscrita en él cada diez grados se denomina *rotación* v $[0^\circ, 360^\circ]$. Cuando el móvil lo colocamos con $v = 0$ tiene un rumbo inicial β_0 . Si $\beta_0 = 0$, tenemos que el triedro del móvil es:

25

$$\begin{pmatrix} \cos(\mu)\cos(v) & -\cos(\mu)\sin(v) & -\sin(\mu) \\ \sin(v) & \cos(v) & 0 \\ \sin(\mu)\cos(v) & -\sin(\mu)\sin(v) & \cos(\mu) \end{pmatrix}$$

De lo que se deduce junto con el triedro inicial:

$$\begin{aligned} \cos(\alpha) &= \sin(\mu)\cos(v) \\ \sin(\alpha)\sin(\gamma) &= \sin(\mu)\sin(v) \end{aligned}$$

30

Por tanto podemos calcular los resultados esperados para cada ángulo en los distintos sectores y a distintas elevaciones del plano mediante las fórmulas:

$$\begin{aligned}\alpha_r &= \arccos (\operatorname{sen}(\mu)\cos(v)) \\ \beta_r &= \delta_r - \operatorname{arctg} (\tan(\gamma_r) / \cos(\alpha_r)) \\ 5 \quad \gamma_r &= \operatorname{arcsen} (\operatorname{sen}(\mu)\operatorname{sen}(v) / \cos(\alpha_r))\end{aligned}$$

y el *azimut* δ_r por estar fijo:

$$\delta_r = \beta_0 + 180^\circ$$

Para determinar el error se realizó el siguiente cálculo con la colección de
10 medidas:

$$\begin{aligned}\omega_r &= \omega_1, \omega_2, \dots, \omega_N \\ \omega_{mvl} &= \omega'_1, \omega'_2, \dots, \omega'_N\end{aligned}$$

Siendo ω_r las medidas esperadas y ω_{mvl} las obtenidas mediante el dispositivo.
15 Estos ángulos yacen en un intervalo $[0, M]$, $M = 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ, 360^\circ$ utilizado en el cálculo del error:

$$e_i = \min \{ \operatorname{Res}(\omega_i - \omega'_i, M), \operatorname{Res}(\omega'_i - \omega_i, M) \}$$

donde:

$$\operatorname{Res}(x, M) = x - [x/M] M \in [0, M)$$

20 es la función “residuo”, resto de un cociente. El error medio queda calculado de la siguiente manera:

$$e = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e_i$$

y está comprendido en el intervalo $[0, M/2]$.

25 En los casos en los que las mediciones de los ángulos, α , β , γ , y δ , que se obtienen mediante el dispositivo no son de gran precisión y el error supera el 20% ($e > 20\%$) se obtienen los llamados ángulos borrosos. Son los siguientes:

- el plano cercano a la horizontal, es decir, $\alpha \approx 90^\circ$, $\gamma \approx 0^\circ$, se usa la siguiente fórmula para calcular el *azimut* δ :

$$\delta = \beta + \arctg (\operatorname{tg}(\gamma) / \cos(\alpha))$$

- el plano casi vertical, es decir, $\alpha \approx 0^\circ$, se usa la siguiente fórmula para
5 calcular el *rumbo* β :

$$\beta = \delta - \arctg (\operatorname{tg}(\gamma) / \cos(\alpha))$$

El error determina la precisión y exactitud de las medidas. El proceso de calibración en el laboratorio se completa a través de un proceso de validación
10 en campo. Las medidas obtenidas mediante técnicas tradicionales para cada ángulo (clisímetro para medir el *cabeceo* α y clisímetro y plomada para medir el *alabeo* γ y brújula para determinar los ángulos de *azimut* δ y *rumbo* β) se comparan con las obtenidas mediante el dispositivo de la misma manera que en el laboratorio, determinando la aptitud del dispositivo para la realización de
15 este muestreo en campo.

Previamente al muestreo se procede a la creación del archivo sobre el que se grabarán los datos en el software del dispositivo y a la configuración del mismo, insertando los campos: identificación del dispositivo, localidad, tipo de
20 hoja, número de individuo, nombre del fichero y aquellos otros necesarios para identificar una medición. (Tabla I)

Se realizarán las mediciones en campo un día poco ventoso con objeto de evitar el continuo movimiento del objeto de muestreo. También se realiza el
25 ejercicio de calibración del magnetómetro consistente en movimientos “en ocho” del dispositivo como recomiendan los fabricantes (fig. 5).

Para ello se sitúa el dispositivo móvil (1) de tal forma que se hace coincidir el extremo distal al teclado del dispositivo con la parte apical de la hoja, el
30 extremo proximal del teclado del dispositivo con la parte basal (próxima al peciolo) de la hoja y con orientación de la superficie de la pantalla del dispositivo en el mismo sentido que el haz (16) o cara anterior de la hoja, que

es la expuesta al sol. Además el dispositivo estará en posición paralela a cada hoja, formando un único plano o en planos paralelos, (fig. 6, a y b).

La estabilidad de la medición que se va a realizar viene representada en la
5 pantalla del aparato, que indica el estado de los sensores del dispositivo. El color del fondo de la pantalla es diferente según los casos:

- si es rojo, indica que las medidas no son correctas debido a que hay mucha variación, poca estabilidad del dispositivo o del muestreador y no pueden almacenarse;
- 10 - si es verde, indica que las medidas sí son correctas y se pueden almacenar.

La primera línea de la pantalla del dispositivo indica si las medidas del acelerómetro son válidas, entonces debe dejarse el móvil estático durante
15 unos segundos para que la medida sea estable y pueda darse como válida.

La última línea de la pantalla del dispositivo indica el estado de calibración de la brújula. Si no está calibrada se puede calibrar dibujando en el aire un ocho con el móvil (fig. 5). Repitiendo este proceso unas cuantas veces se conseguirá una alta calibración y una mayor precisión en la determinación del
20 rumbo.

Tras la verificación de la validez de las medidas se procede al registro de los datos mediante la pulsación de una de las teclas del dispositivo. Dos tipos de sonidos distintos identifican si la medición ha sido o no correctamente
25 almacenada, incrementándose el contador de medidas incorporado, permitiendo conocer el número de medidas realizadas y su posterior verificación con otras mediciones en otros momentos del día para la misma hoja o un mismo grupo de hojas.

30 Para el caso de que se estén utilizando varios dispositivos en la toma de datos se puede verificar qué aparato ha hecho la medida puesto que la

aplicación asigna un identificador de dispositivo. Se incorpora también una descripción del tipo de hoja y del tipo de árbol a medir.

5 Durante la toma de datos se puede verificar, corregir o repetir las mediciones mediante la consulta del archivo creado en el dispositivo.

Los datos se descargan a un equipo informático, por cualquier método que permita la transferencia de datos entre dispositivos como un cable USB, una tarjeta microSD o SD, por sistemas *bluetooth* o por Internet, si ambos
10 dispositivos están alejados geográficamente.

Tras la descarga hay que transformar los datos, para que los ángulos tomados sean coherentes con los cuadrantes sobre los que se calcula la exposición potencial. Así para el azimut δ se cambia la referencia, siendo ahora 0° el Sur,
15 en sentido horario, el Oeste pasa a ser 90° en vez de 270° . Así, si el valor del dispositivo móvil está entre 0° y 180° se le suma 180° y si está comprendido entre 180° y 360° , se le resta 180° .

Estos datos transformados se incluyen en el modelo junto con la posición
20 geográfica del individuo, es decir latitud, longitud y uso horario.

El modelo permite simular la exposición potencial solar relativa para esas hojas a lo largo del día de las mediciones, en porcentaje de superficie. También permite simular la exposición solar potencial en otro momento del
25 año y en otra localización geográfica formando una herramienta predictiva.

La ecuación que permite el cálculo de la variable SAL tiene la forma:

$$\begin{aligned} \text{SAL} = & [(\text{sen}(\kappa) \cdot \text{sen}(\Phi) + \cos(\kappa) \cdot \cos(\Phi) \cdot \cos(\omega))] \cdot \cos(\rho) - \\ 30 & - \text{sen}(\kappa) \cdot \cos(\Phi) \cdot \text{sen}(\rho) \cdot \cos(\delta) + \cos(\kappa) \cdot \text{sen}(\Phi) \cdot \cos(\omega) \cdot \text{sen}(\rho) \cdot \cos(\delta) + \\ & + \cos(\kappa) \cdot \text{sen}(\omega) \cdot \text{sen}(\rho) \cdot \text{sen}(\delta) \end{aligned}$$

El dispositivo arroja las medidas en grados pero el cálculo de la exposición potencial SAL debe hacerse con los valores de los ángulos en radianes, unidad del ángulo plano en el Sistema Internacional.

- 5 Aunque SAL (*Silhouette Area of Leaf blade*) viene definida como un área, el resultado de esta fórmula no es en sí un área. Es decir, no da centímetros cuadrados. Es un ratio 0-1 o un porcentaje de la superficie si multiplicamos el resultado de la fórmula por cien.
- 10 En esta ecuación el término κ representa la declinación del sol respecto del ecuador celestial, es decir su inclinación respecto a la proyección del ecuador en la esfera celeste. Estos valores están extraídos del trabajo "*Fourier series representation of the position of the sun*", de J. W. Spencer (1971) y vienen dados por:

$$15 \quad \kappa = [(0.006918 - 0.399912 \cdot \cos(\eta) + 0.070257 \cdot \sin(\eta) - 0.006758 \cdot \cos(2\eta) + 0.000907 \cdot \sin(2\eta) - 0.002697 \cdot \cos(3\eta) + 0.00148 \cdot \sin(3\eta)] \cdot 180/\pi$$

donde:

$$\eta = (N-1) \cdot 2\pi / 365,$$

siendo N la fracción del año en radianes, con N=1 para el 1 de enero y
20 N=365, para el 31 de Diciembre.

El término Φ es la latitud, medida en grados, y con valor positivo para el Norte (+) y valor negativo para el Sur (-)

- 25 El término ω es el desplazamiento angular del sol sobre el plano de la trayectoria solar. Para 1 hora toma el valor de 15° y se calcula como:

$$\omega = (\text{hora solar} - 12) / 15$$

donde la hora solar a partir de la hora local se calcula mediante la fórmula:

$$\text{hora solar} = \text{hora local} + \text{EoT} / 60 - \text{Lc} - \text{D}$$

- 30 siendo la hora local la del momento a calcular; EoT es la ecuación de tiempo, corregida en minutos, y representa la diferencia entre el tiempo solar aparente y la media solar; y Lc representa la corrección de la longitud. Esta se obtiene por:

$$L_c = (\text{meridiano Standard} - \text{meridiano local}) / 15$$

Por último, el término D representa la corrección entre el horario de verano, de valor +1 y el de invierno, de valor cero (0).

5

El término ρ en el cálculo de SAL determina la máxima pendiente o elevación de la hoja sobre la horizontal y combina el alabeo y el cabeceo de la hoja. Toma los valores: 0° , para la posición horizontal de la hoja con el haz mirando hacia arriba; 90° , para la hoja en vertical; y $\pm 180^\circ$ horizontal, pero con el haz mirando hacia abajo. Su cálculo, siempre antes de la transformación de los cuadrantes, viene dado por:

10

$$\text{sen}(\rho) = \text{sen}(\alpha)\cos(\gamma)$$

donde α es el cabeceo y γ el alabeo medidos con el dispositivo. Una vez calculado se transforma según los cuadrantes correspondientes.

15

El término δ es el azimut medido del haz de la hoja. Como ya se ha comentado, el dispositivo toma como referencia el Norte 0° , pero para el cálculo de la fórmula de SAL es necesario transformar este valor y tomar como referencia 0° en el Sur.

20

FIGURAS

A continuación, para facilitar una mejor comprensión de esta memoria descriptiva y formando parte integrante de la misma, se acompañan una figuras en las que con carácter ilustrativo y no limitativo se ha representado el objeto de la invención.

25

En la figura 1 se muestra el dispositivo (1) con sus ejes de coordenadas XYZ asociados.

30

La figura 2 representa, para una posición dada del dispositivo (1), los ángulos de cabeceo α , de alabeo β , rumbo γ y azimut δ , marcados sobre los ejes cardinales N-E-S-O y sus correspondientes grados.

- En la figura 3 se representa el soporte (2) para el dispositivo que gira sobre la tabla o panel (3), regulable mediante los tornillos “cabeceador” (8) y “alabeador” (9), la circunferencia (4) inscrita, los pies de sujeción (5), los
 5 tornillos (6) para el ajuste de la sujeción del digitalizador (7), la clavija de inserción (10) del soporte (que permite el giro del soporte sobre el plano/tabla a la vez que mantiene el soporte adherido al plano/tabla) en el panel regulable (3)
- 10 La figura 4 representa las posibilidades de giro: del soporte (2) sobre el panel regulable (3): sobre el eje Z (11), sobre el eje Norte-Sur (12) y sobre el eje Este-Oeste (13).

La figura 5 muestra el movimiento “en ocho” para calibrar el magnetómetro.

- 15 Las figuras 6 a) y 6 b) muestran distintas formas de colocar el dispositivo (1) junto a la hoja (14), siempre paralelos y con ambas caras anteriores en la misma dirección y sentido, y mostrando la cara posterior del dispositivo (15), el haz de la hoja (16) o el envés (17). En el caso a) el dispositivo está situado debajo de la hoja y en el b) detrás de ella sobre el eje Norte.

20

MODO DE REALIZACIÓN DE LA INVENCION

El software se ha desarrollado bajo el sistema operativo *Symbian* para un aparato de telefonía móvil Nokia N86.

- 25 El tablero de PVC fue diseñado para el correcto acople del dispositivo móvil y el digitalizador 3D en el taller mecánico de CC. Físicas de la Universidad Complutense de Madrid. El digitalizador 3D utilizado es un sensor de movimiento Fastrak de la marca Polhemus.
- 30 Para la calibración se realizaron medidas cada 10° en la circunferencia inscrita en el tablero a elevaciones crecientes de 5° respecto a la horizontal desde los 0° a los 90°. Se realizaron 648 mediciones para la calibración. El

cálculo del error y las desviaciones estándar entre las medidas obtenidas y las esperadas se realizó mediante Microsoft office y vienen detalladas, para cada ángulo en la tabla II. Los errores están expresados en porcentajes y las desviaciones en ángulos.

5

Para las mediciones de los ángulos borrosos, en los planos cercanos a la horizontal ($\alpha \approx 90^\circ$, $\gamma \approx 0^\circ$) o la vertical ($\alpha \approx 0^\circ$), se obtuvieron mejores resultados y los errores disminuyeron.

- 10 Para el proceso de validación se midieron 100 hojas correspondientes a 5 individuos de acebuche localizados en un vivero. Se buscaron hojas que formasen un único plano y que estuvieran completamente desarrolladas para medirlas con la metodología propuesta y a continuación con una brújula y un clisímetro, según el método tradicional. Para la variable respuesta SAL el error se redujo al 10%, calculada para el mismo momento con las medidas del dispositivo y el método tradicional mediante el software Stella v9.0.
- 15

- Aparecen los resultados en la tabla II de los errores del móvil respecto al clinómetro, también expresados en porcentajes, y las desviaciones estándar, en grados.
- 20

APLICACIÓN INDUSTRIAL

- La invención expuesta sirve para la caracterización espacial de superficies planas y para el cálculo del porcentaje de exposición solar diurna y anual de dichas superficies.
- 25

REIVINDICACIONES

- 5 1. Método para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol caracterizado porque comprende las siguientes etapas:
 1. Calibrar el funcionamiento de un dispositivo móvil mediante un digitalizador 3D (aparato formado por un generador de campo electromagnético y un receptor/sensor que permite calcular la
10 posición y orientación de éste último en el espacio, así como la variación en posición/orientación respecto a una posición anterior) y un soporte;
 2. Verificar la validez de las medidas a tomar por el dispositivo; para ello, se toman datos de posición de hojas con métodos manuales
15 empleando brújula, clinómetro y nivel para posteriormente compararlos con los tomados con el dispositivo móvil.
 3. Tomar datos de posición de la lámina foliar de una hoja mediante un dispositivo móvil dotado de un acelerómetro y un magnetómetro, colocando el dispositivo móvil en posición paralela a la hoja
20 formando un único plano o estando en planos paralelos, haciendo coincidir el extremo distal al teclado del dispositivo con la parte apical de la hoja, el extremo proximal del teclado del dispositivo con la parte basal (próxima al peciolo) de la hoja y con orientación de la superficie de la pantalla del dispositivo en el mismo sentido que el
25 haz (16) o cara anterior de la hoja
 4. Volcar a un equipo informático los datos obtenidos en la memoria del dispositivo móvil;
 5. Calcular la exposición potencial a la radiación directa de la hoja a través un software que incorpora un modelo matemático basado en
30 una relación trigonométrica entre los ángulos determinados (SAL) simulando el porcentaje de área foliar potencial expuesta al sol para

cada hoja y los posibles grupos de hojas en un momento dado del día, a distintas latitudes y en distintas épocas del año;

6. Elaborar predicciones e hipótesis.

- 5 2. Método para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol, según reivindicación 1, caracterizado porque el dispositivo móvil (1) es un teléfono móvil o una tableta.
- 10 3. Método para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol, según reivindicaciones 1 y 2, donde el teléfono móvil es tipo "Smartphone" e incorpora un giróscopo para aumentar la precisión de las medidas tomadas.
- 15 4. Método para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol, según reivindicaciones 1, donde los ángulos foliares son el cabeceo, el alabeo, el azimut y el rumbo.
- 20 5. Sistema para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol mediante la determinación de la posición relativa de la lámina foliar (14) respecto al campo gravitatorio y al campo magnético terrestre, según el método reivindicado, caracterizado porque se utiliza un dispositivo móvil (1) y porque el dispositivo móvil comprende, al menos, un acelerómetro y un magnetómetro.
- 25 6. Sistema para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol, según la reivindicación 5, caracterizado porque el dispositivo móvil (1) es un teléfono móvil o una tableta.
- 30 7. Sistema para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol, según las reivindicaciones 5 y 6, caracterizado porque el teléfono móvil es tipo "Smartphone" e incorpora un giróscopo para aumentar la precisión de las medidas tomadas.

8. Sistema para determinar la exposición solar potencial de las hojas de un árbol, según la reivindicaciones 5, 6 y 7, donde el soporte que se emplea en la etapa de calibración está unido mediante una clavija de inserción que le permite girar libremente sobre el plano de la tabla y paralelo a ella; la tabla (3) está adosada a un trípode (5) para sustentarla y se regula por dos tornillos: el tornillo "cabeceador" (8), que permite el cabeceo (13) sobre el eje Norte-Sur en el panel regulable, y el tornillo "alabeador" (9) que permite, a su vez, el alabeo sobre el eje Este-Oeste (12) del panel; la tabla presenta grabada una circunferencia (4) y un anclaje (7) para colocar el digitalizador 3D ajustado por dos tornillos (6)

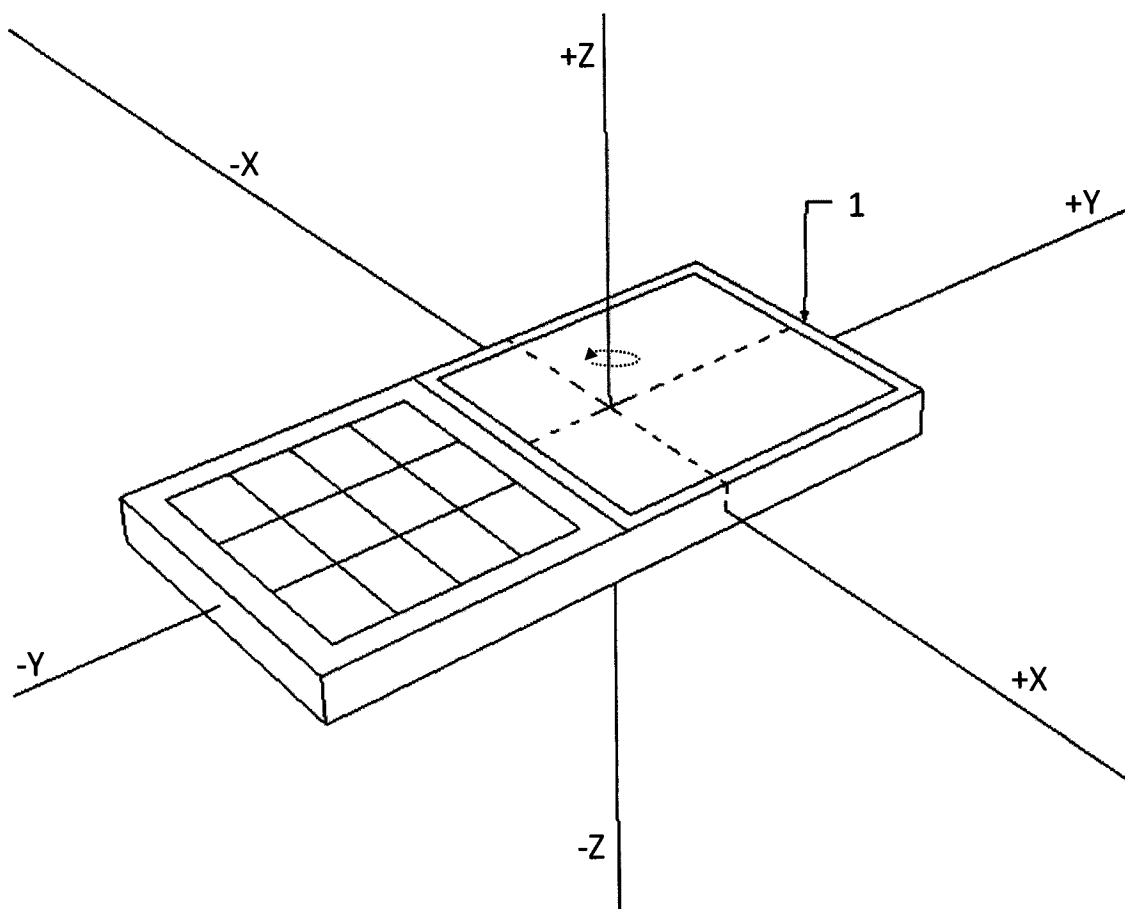


Fig. 1

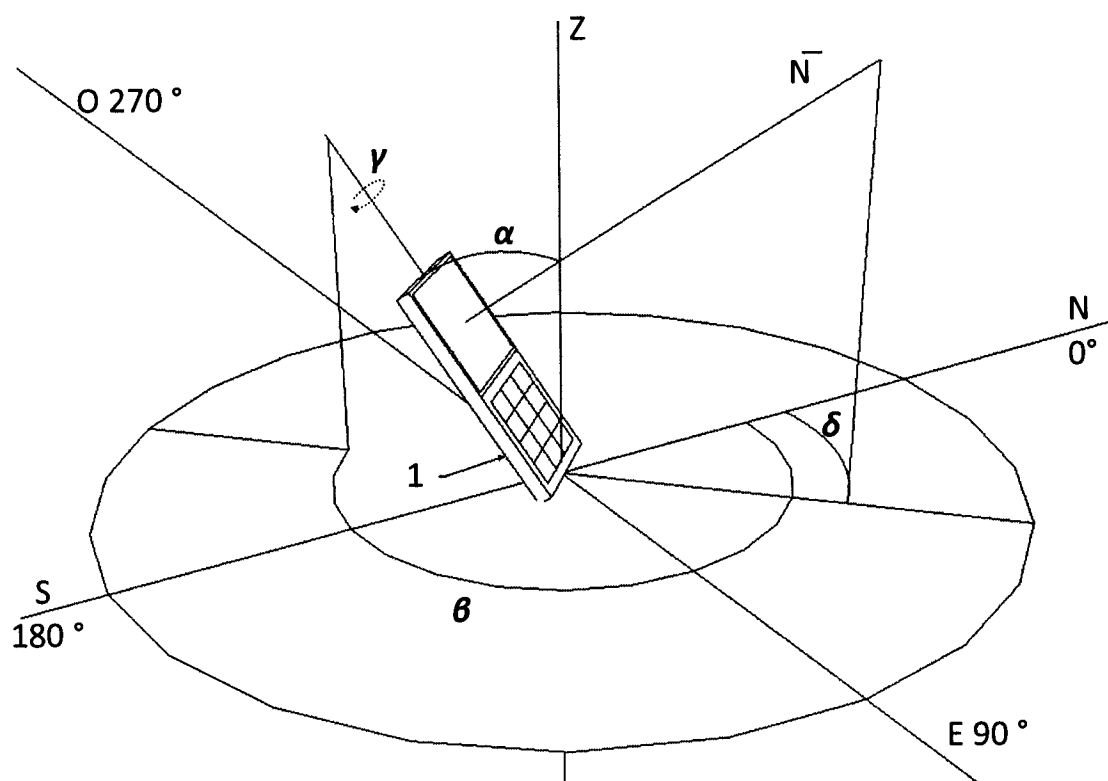


Fig. 2

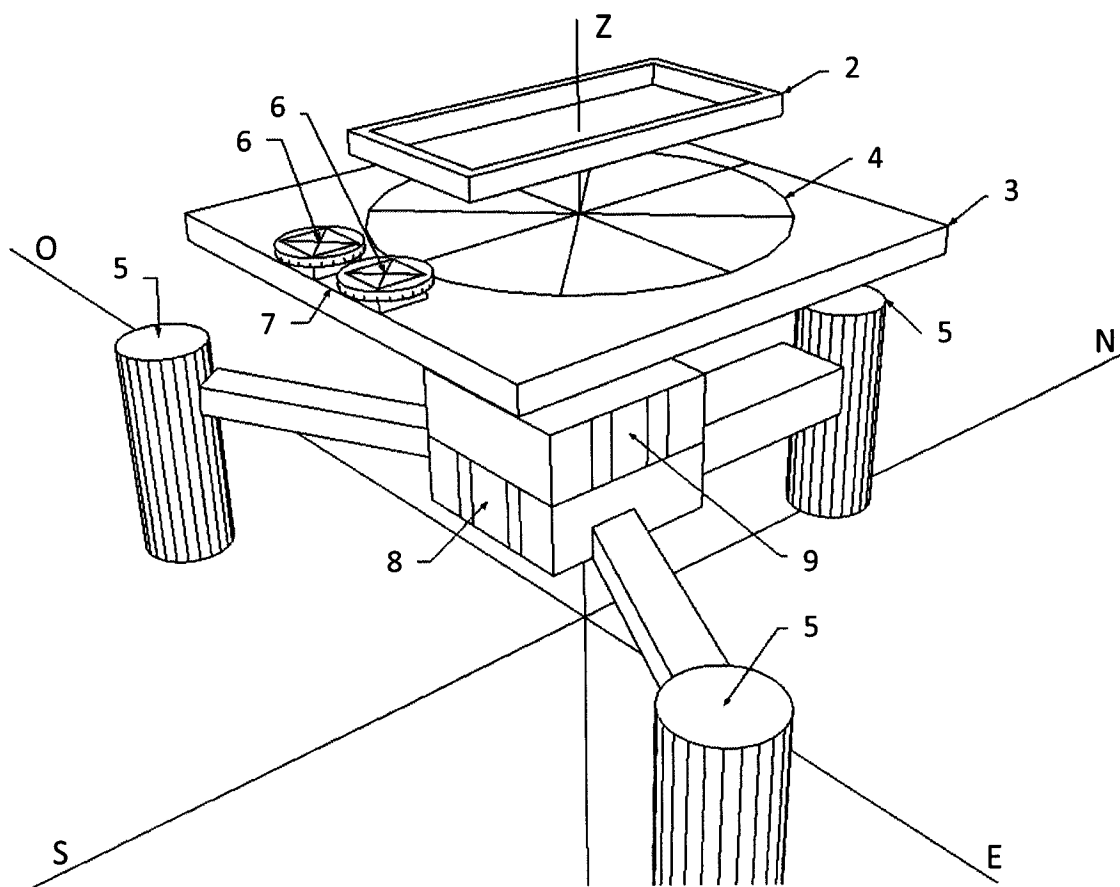


Fig. 3

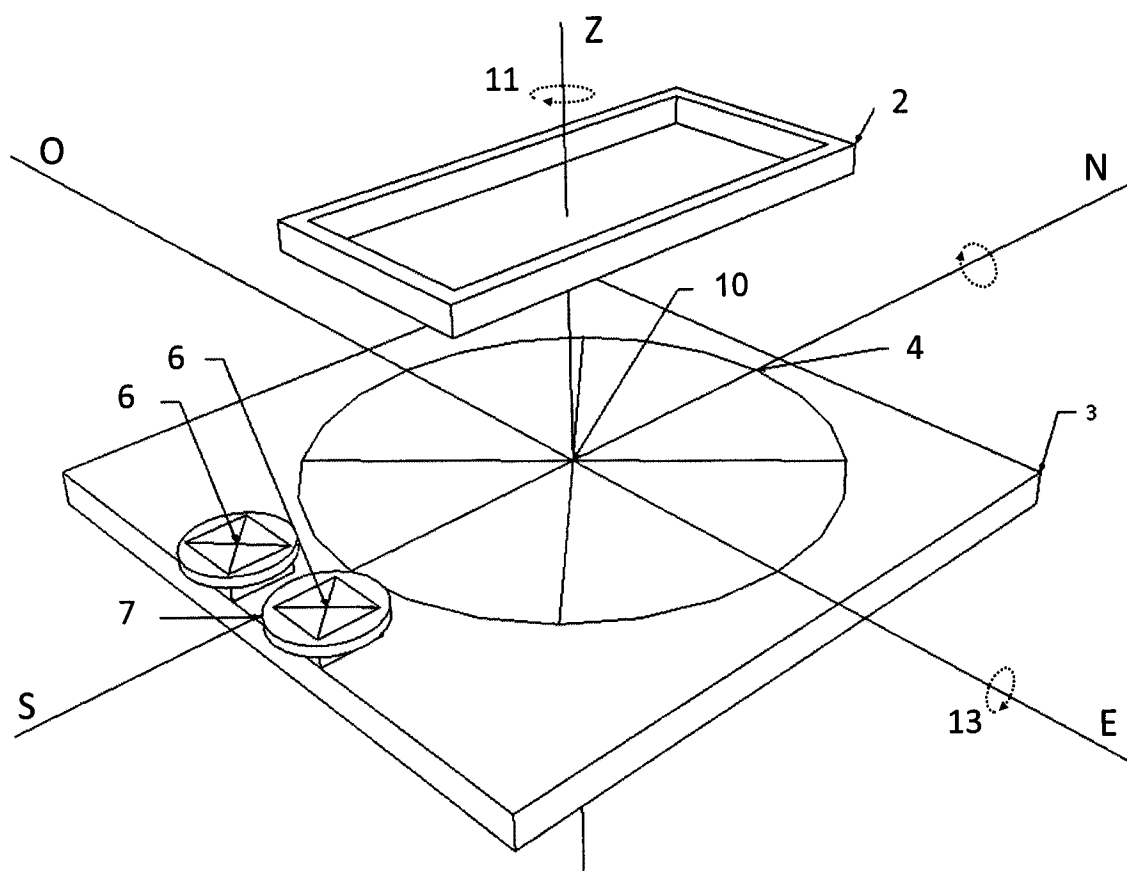


Fig. 4

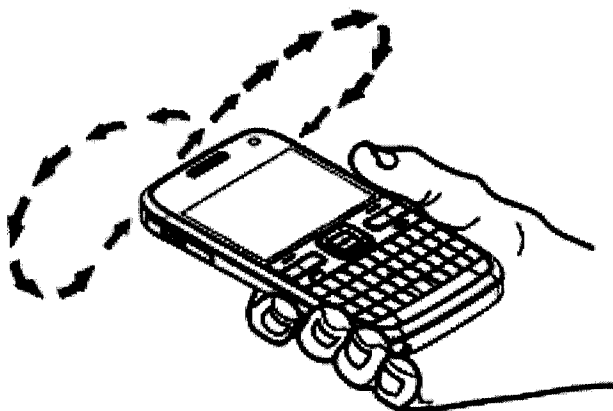


Fig. 5

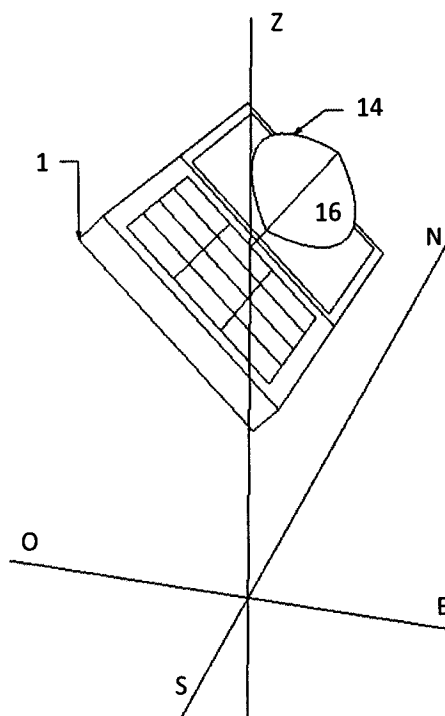


Fig. 6 a)

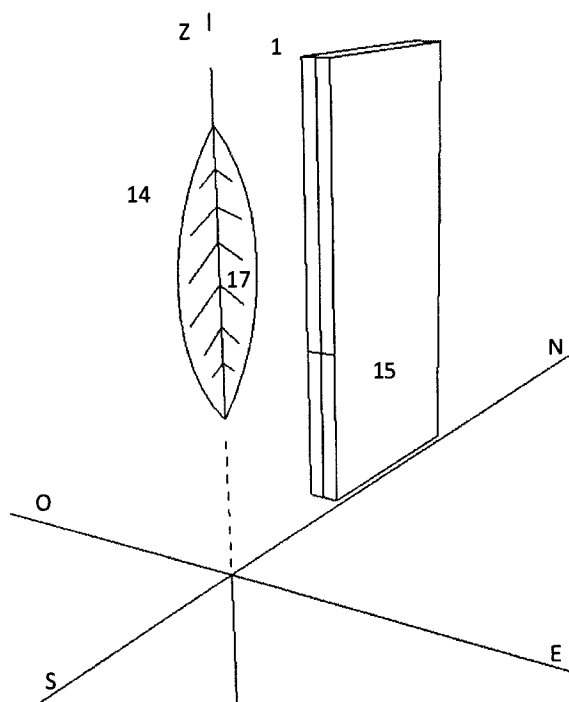


Fig. 6 b)

Tabla I

Orden	Campo	Valor
1	ID_Móvil	Identificador del Móvil. Valor numérico entre 0 y 99
2	Fecha y Hora de la medida	dd/mm/aaaa Información de día, mes, año hh:min:ss.s. Hora en formato 24 horas, minutos, segundos y décima de segundo
3	Tipo_Arbol	Cadena de texto introducida en la configuración
4	Contador_Arbol	Valor numérico del número de árbol configurado en Opciones
5	Tipo_Hoja	Cadena de texto introducida en la configuración
6	Contador_Hoja	Valor numérico del contador automático de hojas/medidas realizadas
7	Alabeo	Ángulo de inclinación de Alabeo medido en grados con decimales separados por ‘.’
8	Cabeceo	Ángulo de inclinación de Cabeceo medido en grados con decimales separados por ‘.’
9	Rumbo1	Rumbo magnético del vector normal a la hoja medido en grados con decimales separados por ‘.’
10	Rumbo2	Rumbo magnético del eje longitudinal de la hoja medido en grados con decimales separados por ‘.’
11	Latitud	Latitud de la posición GPS en grados con decimales separados por ‘.’
12	Longitud	Longitud de la posición GPS en grados con decimales separados por ‘.’
13	Satélites	Número de satélites empleados en la medida de posición GPS. Si es inferior a 3 la medida no es válida, con 3 la medida es muy poco precisa, con 4 o más la medida tiene mayor precisión.

Tabla II

	Cabeceo α	Alabeo γ	Rumbo δ	Azimut β	Máxima pendiente ρ	Cabeceo 2	Azimut 2	SAL
Error (%)	5,46	1,90	1,55	5,85	2,18	3,11	2,91	1,76
Desviación estándar \pm (°)	12,35	6,68	4,99	15,13	4,36	8,46	14,88	0,10
Clinómetro/Móvil Error (%)	7,69	12,45	4,77	5,11	-	-	-	10,06
Desviación estándar \pm (°)	18,26	24,52	18,87	17,11	-	-	-	0,17