



6º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

6CFE01-600

Montes: Servicios y desarrollo rural
10-14 junio 2013
Vitoria-Gasteiz



Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013
ISBN: 978-84-937964-9-5
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

eCOMMONtech: plataforma software para monitorización del balance de Gases de Efecto Invernadero en el marco de Mecanismos de Desarrollo Limpio Forestales y proyectos REDD+

NATAL, A.¹, GARCÍA, F.¹, LIZARRALDE, I.², MARTÍNEZ, R.³, CAFFAREL, J.³, ROBLES, L.⁴
Y ALIJA, A.⁵

¹Dimap, S.L.

²Fundación Cesefor

³CeDInt-UPM

⁴Aenor

⁵Ingenieros Asesores

Resumen

La monitorización de las condiciones que debe cumplir un área forestal en proyectos MDL o REDD de manera tradicional, es decir, mediante mediciones y controles *in situ*, conlleva unos costes difíciles de asumir. Por ello, se ha planteado el desarrollo de una metodología capaz de integrar tecnologías orientadas a la realización de inventarios de carbono en áreas forestales de países en vías de desarrollo, mediante la utilización de diferentes tecnologías (sensorización ambiental, teledetección espacial, técnicas forestales, internet, etc.) que permiten determinar aquellos procedimientos más eficaces desde el punto de vista de la calidad y fiabilidad de la información obtenida y del coste/beneficio; analizando, las mejoras que suponen frente a los métodos tradicionales. Para ello, se desarrollan algoritmos y métodos de análisis necesarios para extraer las variables e indicadores medioambientales con el fin de realizar la monitorización de los ciclos de carbono en ámbitos forestales atribuibles a proyectos de absorciones de CO₂. El resultado es la creación de una plataforma web que permite la monitorización remota y en tiempo real de inventarios de carbono a través de la integración de datos provenientes de sistemas de sensorización, imágenes tratadas con tecnologías de observación de la tierra y datos de campo.

Palabras clave

Forestal, REDD, MDL, redes de sensores, teledetección, carbono.

1. Introducción

El proyecto eCOMMONtech tiene como objetivo principal el diseño y desarrollo de una Plataforma software para la monitorización y control de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero – GEI – en el marco de los mecanismos de desarrollo limpio – MDL – forestales. Esta iniciativa surge como consecuencia de la necesidad de disponer de técnicas y sistemas basados en las TICs que despejen la incertidumbre en el seguimiento de las emisiones y absorciones de carbono en áreas forestales de países en vías de desarrollo, comprometidos entre las Partes del Protocolo de Kyoto en Proyectos de Desarrollo.

El proyecto presenta como mayor novedad tecnológica la integración de diferentes técnicas aplicadas al campo de la gestión forestal sostenible, y más concretamente, al desarrollo de proyectos MDL forestales: la utilización de nuevas técnicas integradas para la captación de datos de concentraciones de carbono ha tenido todavía poca penetración debido en parte a la complejidad que supone la adquisición, tratamiento y análisis de estos datos y a

la escasa experiencia que existe para la ejecución de proyectos de estas características. Con este proyecto se pretende dar un paso adelante en la aplicación de estas técnicas, desarrollando no sólo algoritmos que permitan la extracción de parámetros útiles para la gestión forestal, sino además contrastando los resultados que se obtengan, desde varios puntos de vista. Así, se tendrá en cuenta la calidad, el coste/beneficio, o la comparación con las técnicas tradicionales. Todo esto con objeto de determinar su grado de interés desde el punto de vista operativo, un aspecto que no ha sido contemplado hasta la fecha por otros proyectos.

Las diferentes tecnologías empleadas en el proyecto incluyen:

- Teledetección espacial y SIG
- Tecnología forestal
- Sistemas de sensorización ambiental inalámbrica
- Plataforma web de monitorización

2. Objetivos

El objetivo principal de eCOMMONtech es el desarrollo de una plataforma para el monitoreo remoto de proyectos MDL o REDD+ de manera que se consigan importantes ahorros de coste de inventario respecto a las metodologías actualmente establecidas para proyectos MDL o REDD+.

Para poder conseguir este objetivo principal, el proyecto se articula en diversos objetivos específicos:

- I. Mejora de los servicios y procesos de gestión eficaz para el establecimiento de la línea base y su monitoreo. Dicha mejora pasa por la integración de tecnologías que sustituyan la realización de costosos procesos de análisis y generación de datos actuales.
- II. Adquisición del conocimiento detallado de técnicas de monitoreo aplicadas en la actualidad en los diferentes países del mundo bajo el cumplimiento de las metodologías ONU y recopilación de una guía de referencia.
- III. Definición de indicadores ambientales extraídos a través de diferentes técnicas para el monitoreo de MDLs. Así como definición de las metodologías de obtención y tratamiento de dicha información.
- IV. Estudio de evaluación y análisis de potenciales escenarios MDL mediante simulación dinámica.
- V. Definición de herramientas tecnológicas de gestión vía web que puedan actuar como instrumentos de diagnóstico, evaluación y seguimiento de proyectos MDL por parte de los gestores y por los ciudadanos.
- VI. Investigación para el desarrollo de algoritmos que permitan la extracción y análisis de la información requerida a través de las diferentes técnicas utilizadas (teledetección, sensorización, selvicultura, internet, etc.).
- VII. Adquisición de las tecnologías y el conocimiento necesario para ser capaces de definir y diseñar un sistema avanzado, que, integrado por diferentes técnicas, proporcione la información y modelización necesarias para monitorizar carbono en proyectos MDL.

3. Metodología

Selección de la zona de estudio

Entre las diferentes zonas forestales consideradas que se analizaron se consideró que el monte de Urbión reunía las características más apropiadas para ser considerada la zona piloto de estudio del proyecto. Entre las ventajas más interesantes se encuentra el hecho de que es un bosque modelo, cuya catalogación lo es tanto para un área geográfica como un enfoque específico basado en una base social estructurada en asociaciones para la gestión forestal sostenible. Geográficamente, un bosque modelo debe abarcar una superficie terrestre lo suficientemente grande como para representar a todos los usos y valores del bosque.

El bosque de Urbión es la masa boscosa continua más extensa de la península ibérica, abarca 100.000ha de superficie, entre las provincias de Burgos y Soria. La zona de actuación se caracteriza por la siguiente cobertura vegetal:

- El pino silvestre o albar (*Pinussylvestris*L.) es el árbol más frecuente y emblemático de la Comarca.
- Se pueden observar pinos resineros o negrales (*Pinuspinaster*Ait.), pinos laricios o pudíos (*Pinusnigra*Arn.), hayas (*Fagussylvatica*L.), sabinas (*Juniperusthurifera*L.), robles rebollos (*Quercuspirenaica* Willd.) o quejigos (*Quercusfaginea*Lam.), además de innumerables arbolillos como arces, acebos, sauces, etc.
- Los pastos de alta montaña y sus circos glaciares donde aparecen lagunas (Neila, Negra) y zonas turbosas son áreas de gran valor ecológico y paisajístico.

Se trata de una zona en la que convergen distintos espacios naturales protegidos (Parque Natural del Cañón del Río Lobos, Reservas de Sierra de Urbión y Sierra de la Demanda, Reserva Natural del Sabinar de Calatañazor) y figuras de protección (Espacios Naturales de Sabinar de La Yecla y La Fuentona, ZEPA Sierra de la Demanda y Sierra de Urbión y LIC Sierra de la Demanda, Sierra de Urbión y Cebolleras, Riberas del Río Duero y afluentes) donde habitan gran número de especies representativas de los ecosistemas presentes.

Revisión MDL

Al tratarse de un sistema novedoso y no aplicado en el monitoreo de proyectos forestales en el marco de los Mecanismos de Desarrollo Limpio, se estableció un sistema de revisión de las distintas metodologías aprobadas, de manera que se pudiera comprobar en qué metodologías se podría aplicar el sistema de monitoreo mediante sensorización. En la mayoría de los casos, su utilización directa no estaba definida, pero sí un marco general en el que se pudiera aplicar. Por otro lado, el alto grado de desarrollo de nuevas metodologías en el momento de realizar el trabajo, junto con la incipiente aparición de metodologías REDD+ permitía asegurar una buena aplicabilidad futura de todos los sistemas desarrollados en el proyecto.

Inventario forestal

Se trataba básicamente de realizar una serie de mediciones en campo para la obtención de datos dendrométricos mensurables en la zona de estudio que sirvieran para fases posteriores en las que se estudiaran posibles ecuaciones que relacionen la realidad medida en campo con la información de los sensores. Se realizaron distintas mediciones utilizando métodos no destructivos. En concreto se siguió un protocolo de toma de datos (RODRÍGUEZ y LIZARRALDE, 2009; RODRÍGUEZ et al., 2012) basado en el uso de aparatos láser de medición de manera que se pueden obtener gran cantidad de datos de manera no destructiva, es decir, sin aprear árboles.

El proceso consiste en la utilización de un relascopio/dendrómetro láser (Criterion RD1000) unido a un hipsómetro láser (Trupulse) y una pda (Trimble), todo montado sobre un trípode. El True Pulse es un hipsómetro laser que permite medir distancias a objetos, pendientes, inclinación y acimut y calcular la distancia horizontal y vertical o altura. Gracias a su tecnología láser y a su óptica de 7 aumentos, las mediciones son realmente precisas, rápidas y fáciles de ejecutar. Por otra parte, con el dendrómetro electrónico Criterion RD1000, utilizando el sensor de inclinación integrado se pueden tomar datos de diámetro en cualquier punto del fuste así como la altura a la que se alcanza un determinado diámetro. La combinación de medidas de ambos aparatos permite cubicar árboles en pie (distancia “reducida” al árbol y altura total con True Pulse y diámetros a distintas alturas con Criterion RD1000).

La toma de datos se realizó sobre una muestra de árboles en la zona exacta donde están instalados los sensores para poder obtener una relación directa entre la información de los sensores y los datos dendrométricos obtenidos. Así, los datos obtenidos de la medición no destructiva son los siguientes: distancia reducida desde el aparato a cada uno de los árboles medidos, altura total del árbol, diámetro a la altura del pecho y una serie de pares de datos de diámetro/altura a lo largo del tronco de cada árbol medido. Estos datos permiten calcular a posteriori el volumen de cada uno de los árboles medidos y, por extensión, un volumen medio de la zona. El uso de ecuaciones de perfil ya desarrolladas para la especie y la zona, junto con el uso del complemento de Excel CubiFOR(RODRIGUEZ et al., 2008) permite realizar dichos cálculos.

También se midió la altura de colocación del dendrómetro continuo junto con el diámetro a dicha altura en los árboles en los que se había instalado un dendrómetro en continuo para medir las modificaciones del diámetro.

Todas estas mediciones, junto con los datos de los sensores instalados, permiten crear relaciones para llegar a los objetivos de monitorización online que se pretenden.

Teledetección espacial

La Teledetección (o tecnología que permite el desarrollo de aplicaciones a partir de imágenes de satélite de observación de la Tierra) tendrá una contribución primordial en la monitorización de los niveles de carbono en la atmósfera y su implementación en los acuerdos del protocolo de Kyoto(UNFCCC, 2001):

- Tecnología capaz de proporcionar observaciones sistemáticas de la cobertura terrestre de manera repetida y consistente (artículos 5 y 10 del protocolo de Kyoto).
- Tecnología capaz de establecer los depósitos de carbono de 1990, año de referencia de las reducciones comprometidas (artículo 3 del protocolo de Kyoto).
- Capacidad para detección y cuantificación espacial de cambios en la cobertura terrestre (artículo 3 y 12).
- Cuantificación de depósitos de biomasa vegetal y cambios asociados en ellos (artículos 3 y 12).
- Localización y seguimiento de algunas fuentes antropogénicas de CH₄ (artículos 3, 5 y 10).

Por otro lado, los Sistemas de Información Geográfica (SIG) permiten gestionar y explotar la información desde un punto de vista geográfico. Su aplicación en el presente proyecto obedece a los siguientes ítems: análisis conjunto de la información procedente tanto de las imágenes de satélite como de los sensores y diagnóstico de situaciones; representación gráfica de los elementos tecnológicos y medioambientales abarcados por el proyecto; publicación web de los resultados y análisis obtenidos a lo largo del proyecto.

Sensorización ambiental

Las redes de sensores de comunicación inalámbrica destacan también dentro del conjunto del proyecto como una tecnología altamente novedosa tanto en lo referente a la adquisición de variables ambientales in situ como a la transmisión de la información captada en tiempo real. Asimismo, es de destacar que su aportación puede ser de gran interés en la implementación de los acuerdos del protocolo de Kyoto: tecnología capaz de proporcionar observaciones sistemáticas de las concentraciones de CO y CO₂ de manera repetida y consistente (artículos 5 y 10 del protocolo de Kyoto); cuantificación de depósitos de biomasa vegetal y cambios asociados a ellos (artículos 3 y 12).

Para ello, se emplean modernos sensores que presentan unas novedades respecto a otros tipos de sensores que se venían utilizando hasta ahora, tales como: gran reproducibilidad de los nanosensores debido a que la tecnología empleada en su fabricación asegura crecimientos muy homogéneos de la lámina delgada sensible; bajo coste dado que su reducido tamaño hace que en un solo proceso de fabricación se pueden obtener centenares de unidades, lo cual asegura también su reproducibilidad; pequeño tamaño, bajo consumo eléctrico lo cual facilita enormemente su aplicabilidad en sistemas pequeños y/o portátiles, gracias también al reducido tamaño de los sensores y a la posibilidad de emplear energía solar para su funcionamiento.

Monitorización de la red de sensorización ambiental

La plataforma web de monitorización desarrollada en el ámbito del proyecto eCOMMONtech(<http://www.ecommontech.com/>) consta de tres partes: una red de sensorización ambiental instalada en el bosque objetivo, una base de datos donde se

almacenan los datos de la red y un servidor desde el que se ofrece un servicio de visualización de datos. El servidor obtiene la información a mostrar de dos fuentes: la propia red de sensorización ambiental y datos procedentes de teledetección espacial.

Por un lado, se ha desplegado una red de dispositivos inalámbricos con sensores de temperatura, humedad e iluminación, instalándolos en los árboles del bosque objetivo. Los dispositivos, además, están conectados a dendrómetros que miden las variaciones en el calibre del tronco de los árboles, para monitorizar sus variaciones crecimiento durante un año. Las medidas tomadas por los sensores se envían cada 30 minutos a un nodo coordinador que, a su vez, las almacena y envía a través de Internet al servidor conectado a la base de datos para su almacenamiento. La figura 1 representa el esquema de la red:

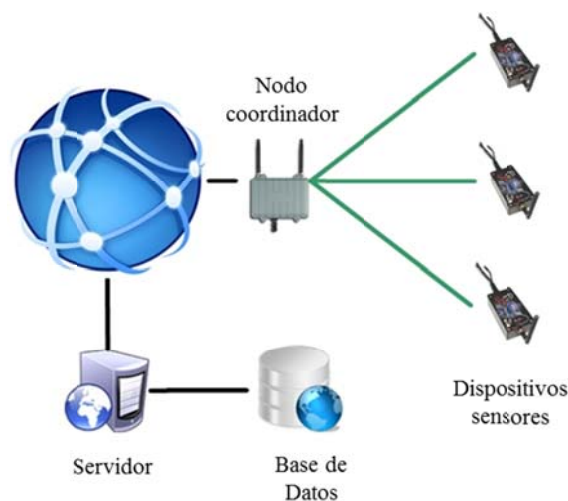


Figura 1. Esquema de la red sensorial ambiental

Por otro lado, mediante el análisis e interpretación de imágenes obtenidas mediante teledetección espacial se extraen parámetros forestales básicos y variables dasométricas que permiten un análisis detallado y fiable de las condiciones de la zona bajo estudio.

4. Resultados

Base de datos

Los datos enviados por la red de sensores son almacenados en una base de datos que cuenta, entre mayo de 2011 y mayo de 2012, con más de 5.000 registros con medidas de temperatura, humedad, iluminación, gases (CO) y diámetro del tronco.

Algoritmos

Esta fase pretendía obtener las ecuaciones y algoritmos necesarios que relacionaran los datos dendrométricos tomados en campo con la información aportada por los sensores. El objetivo final era poder monitorizar las zonas forestales de manera que se determinara si se han dado cambios en la vegetación que hicieran incumplir los requisitos para que el proyecto sea MDL. Obteniendo una relación entre los datos reales en campo y la información sensorial

se podrían estimar dichos cambios de vegetación de manera remota a través de los datos de concentración de CO o CO₂ de los sensores instalados.

Para el desarrollo de algoritmos se utilizó el procedimiento NLIN del paquete informático SAS (SAS INSTITUTE INC., 2010) de manera que se pueda conseguir la ecuación más eficiente con las mejores estimaciones posibles. La ausencia de un gran número de datos dificulta esta labor ya que las ecuaciones deben ser ajustadas teniendo un pequeño número de datos, lo que puede derivar en un peor comportamiento de las estimaciones a pesar de que los estadísticos de ajuste sean buenos.

Con los datos existentes, se trazó una estrategia de modelización tomando como base los datos de volumen como variables dependiente y los datos de diámetro normal, altura total y concentración de CO como variables independientes.

El volumen como tal no es un dato tomado en campo, por lo que se recurrió a la utilización de ecuaciones de perfil ya existentes para la especie y la zona. Así, se introdujeron los datos de diámetro y altura en el complemento de Excel CubiFOR (RODRIGUEZ et al., 2008) de tal manera que se obtuvieran datos de volumen por integración de ecuación de perfil. La ecuación de perfil utilizada para dicha especie y zona es una ecuación de perfil de exponente variable denominada Stud (DAQUITAINE ET AL., 1999) y que se ha demostrado que funciona muy bien con distintos datos de especies y localizaciones gracias a la plasticidad del exponente variable. La formulación básica, sin parámetros ajustados de la ecuación utilizada es la siguiente:

$$d = \left(1 + a_3 \cdot e^{-a_4 \cdot hr}\right) \cdot \left(a_5 \cdot DBH \cdot (1 - hr) \left(a_{10} + a_{11} \left(\frac{HT}{DBH}\right) + a_2 \cdot (1 - hr)\right)\right)$$

Dicha ecuación, ajustada para la especie y zona estudiada, queda integrada en CubiFor de manera que se obtienen los datos de volumen siguiendo la integración de la ecuación.

Una vez obtenido el volumen, el paso final consistía en desarrollar una ecuación que relacionara dicho volumen con el resto de variables existentes, entre ellas, las que tuvieran información de sensores.

Tras analizar distintas formulaciones de ecuaciones, tanto lineales, log-lineales como no-lineales, los mejores resultados se dan utilizando técnicas no-lineales y con la siguiente formulación:

$$\text{vol} = [1 / (a_1 \cdot (\sqrt{\text{CO} + 10})) + (a_2 \times \text{DBH} \times \text{HT}) a^3]$$

Al contar con pocos datos y no tener una muestra para la validación de la ecuación, se optó por realizar una validación cruzada, técnica muy utilizada y con una gran fiabilidad, permitiendo un buen ajuste tanto en ajuste como en validación. Los estadísticos de ajuste son realmente buenos a pesar de los pocos datos, con una eficiencia de modelización, es decir, una varianza explicada, por encima del 98%, un sesgo de 0.0025 m³ de sobrestimación y una precisión de 0.03 m³. Estos estadísticos aportan, sin duda, una gran fiabilidad al ajuste realizado.

Plataforma web

El servidor desarrollado puede considerarse un WMS (Web MapService), ya que permite reproducir en cualquier navegador web imágenes digitales en formatos ligeros y estándar (JPG, PNG, etc.) partiendo de imágenes cartográficas en formatos pesados y muy específicos, como TIFF.

En general, un servidor WMS es invocado mediante el envío de peticiones a una URL. Dicha petición es recibida y procesada por el servidor, que devolverá como resultado la imagen solicitada. Una característica interesante del servidor del proyecto eCOMMONtech es que las peticiones de las diferentes capas no tienen por qué ser solicitadas al mismo servidor, pudiendo provenir de diferentes fuentes. Si dichas imágenes están codificadas en formatos que admiten transparencias, como GIF o PNG, las diferentes capas se pueden superponer, permitiendo un solapamiento de las mismas en la imagen final. De este modo, utilizando un único servicio web, es posible unificar la visualización de diferentes fuentes cartográficas desde el propio navegador (IGN, PNOA, fuentes de datos propias, etc.), no siendo necesaria la utilización de sistemas SIG más pesados. La figura 2 representa el aspecto general de dicho servicio de visualización:



Figura 2. Aspecto general del servicio de visualización

Otra de las funcionalidades del servicio web desarrollado es que permite visualizar la evolución histórica de cualquier banda de color de cada uno de los diferentes puntos en la imagen satelital que se está viendo en ese momento. Mediante el uso de dos calendarios desplegables, se elige el inicio y el final de la serie histórica que se desea consultar. Al seleccionar a continuación cualquier punto del mapa, se obtiene una gráfica con la evolución del color de esas mismas coordenadas a lo largo del periodo temporal deseado, comparando el valor RGB (Red Green Blue) de ese punto en todas las imágenes almacenadas en el sistema que estén entre esas dos fechas. De este modo se pueden observar gráficamente las variaciones de masa forestal en un área determinada. La figura 3 representa dicha interfaz:

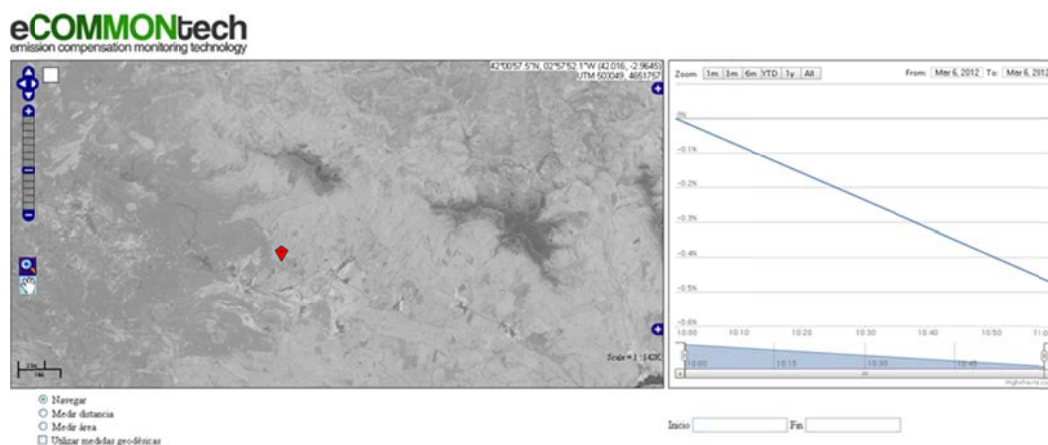


Figura 3. Interfaz web de la serie histórica

5. Discusión

Los algoritmos obtenidos a partir del análisis de los datos de sensores y las mediciones en campo deben ser extrapolados a la totalidad de la zona de estudio (BMU) mediante la utilización de imágenes de observación de la tierra y posteriormente validados en otras masas boscosas de características diferentes. Como se ha comentado en los resultados, la escasez de datos dendrométricos hace que sea recomendable tomar con cautela los resultados que pudieran derivarse de la ecuación desarrollada. Por ello, sería recomendable ampliar la base de datos dendrométricos a lo largo de la zona de estudio para mejorar la relación con los datos de sensores.

La extrapolación a masas boscosas de mayor tamaño, situadas en regiones remotas de difícil acceso, requiere de una modificación en los protocolos de comunicación de las motas de sensores que requerirán de una mayor autonomía y capacidad de conexión con el servidor web. Al tratarse del primer ensayo piloto de este tipo, también sería recomendable la toma de datos dendrométricos que aseguren una mayor fiabilidad de las relaciones obtenidas, sobre todo, si la extrapolación se pretende hacer a áreas con distintas especies o estructuras forestales.

La medición de CO₂ en aire mediante redes de sensores ambientales (de bajo coste) es poco fiable (interferencias con humedad, temperatura, etc.), no así la medición de CO, que puede dar una buena indicación de la actividad vegetativa de los árboles.

6. Conclusiones

La plataforma desarrollada permite monitorizar, por un lado, los parámetros ambientales y dendrométricos de la zona en estudio, de forma remota y autónoma mediante una red de sensores inalámbricos instalados en el bosque modelo Urbión. Dicha red permite una medición constante de dichos parámetros en diferentes puntos de la zona en estudio, a un coste reducido y limitando enormemente la interacción humana en el propio proceso de monitorización.

Por otro lado, la interfaz web implementada permite visualizar las variaciones de masa forestal a partir de una serie histórica de imágenes de teledetección de forma remota, utilizando cualquier navegador web y por lo tanto sin la necesidad de emplear programas de tratamiento de imágenes geográficas para su visualización y procesado.

7. Agradecimientos

El Proyecto eCOMMONtech ha sido financiado en 2010 por el Ministerio de Industria, Turismo y Comercio (ref. TSI-020100-2010-289), bajo la convocatoria de ayudas de Acción Estratégica de Telecomunicaciones y Sociedad de la Información del subprograma Avanza Competitividad I+D+i.

8. Bibliografía

DAQUITAINE, R.; SAINT-ANDRÉ, L.; LEBAN, J.M; 1999. Modelling stem properties distribution. Final report of Subtask A2.1. Stud research project. FAIR CT-96-1915. En: LEBAN, J.M.; HERVE, J.C. (Eds.) INRA-ERQB Documento interno 3-23

OPEN GEOSPATIAL CONSORTIUM; 2006. OpenGIS Web Map Service (WMS) Implementation Specification.

RODRÍGUEZ, F.; LIZARRALDE, I.; 2009. Non-destructive measurement techniques for taper equation development. A study case for black pine (*Pinus nigra* Arn.) in the Northern Iberic Range (Spain). Forest, wildlife and wood sciences for society development. Praga

RODRÍGUEZ, F.; FERNÁNDEZ, A.; LIZARRALDE, I.; CONDES, S.; 2012. Non-destructive measurement techniques for taper equation development. A study case for black pine (*Pinus nigra* Arn.) In the Northern Iberian Range (Spain). Aceptado en *European Journal of Forest Research*

RODRÍGUEZ, F.; BROTO, M.; LIZARRALDE, I.; 2008. CubiFOR: Herramienta para cubicar, clasificar productos y calcular biomasa y CO₂ en masas forestales de Castilla y León. *Montes* 95 33-39

SAS INSTITUTE INC.; 2010. SAS/ETS®9.2 User's Guide. Available at: <http://support.sas.com/>

UNFCCC; 2001. Marrakesh Accords. Conference of the Parties 7 (COP7). Marrakesh, Moroco.