



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a
los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales
Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022
ISBN 978-84-941695-6-4
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Puesta en valor de tierras marginales como sumideros de carbono en Europa: el proyecto MAIL

GALLEGO CIPRÉS, F.¹, BEZARES SANFELIP, F.¹, ABAD GALLEGO, A.¹, GOMEZ CONEJO, R.¹ y MARTIN COLLADO, L.¹

¹ Fundación Centro de Servicios y Promoción Forestal y de su Industria de Castilla y León.

Resumen

El cambio climático es un problema global y su mitigación uno de los 17 objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU. Una contribución a la estrategia de mitigación para aumentar la fijación de CO₂ puede venir del uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura (LULUCF por sus siglas en inglés), y de la utilización de tierras marginales que hoy en día están ampliamente disponibles en Europa.

El proyecto MAIL (Identificación de tierras marginales en Europa y fortalecimiento de su contribución potencial a la estrategia de fijación de CO₂, GA N° 823805, H2020-MSCA-RISE-2018), se centra en identificar estas áreas utilizando técnicas de teledetección y análisis espacial, para después clasificarlas en grupos según su capacidad de fijación de carbono, en la propuesta de medidas para alcanzar esta fijación y en la evaluación de su viabilidad.

Los principales objetivos son la definición de los parámetros que describen las tierras marginales desde el enfoque anteriormente descrito; el procesamiento de datos para determinar la mejor manera de cartografiar y monitorizar estas áreas, cuantificar la capacidad potencial de secuestro de CO₂, propuestas de actuación para su fijación y la diseminación de sus resultados, todo ello a escala europea

Palabras clave

Fijación CO₂, Cambio Climático, mitigación, restauración.

1. Introducción

Durante los últimos 20 años se han hecho progresos significativos en la reducción de Gases de Efecto Invernadero (EEA, 2014; EC, 2015; EUROSTAT, 2015a; EUROSTAT, 2015b). Para ello, la UE aplica actualmente dos políticas fundamentales para reducir las emisiones de CO₂, cada una de las cuales aborda el problema desde un punto de vista diferente. Más concretamente:

i. EU ETS (Sistema de Comercio de Emisiones)

El sistema funciona poniendo un límite a las emisiones globales de los sectores industriales de alta emisión que se reduce cada año. Dentro de este límite, las empresas pueden comprar y vender derechos de emisión según sus necesidades. Además, el límite de derechos de emisión se reduce un 1,74% al año y está previsto que se reduzca un 2,2% a partir de 2021.

ii. Decisión de Esfuerzo Compartido (ESD)

La DEE establece objetivos anuales vinculantes de emisiones de GEI para los Estados miembros durante el periodo 2013-2020. Estos objetivos se refieren a las emisiones de la mayoría de los sectores no incluidos en el EU ETS, como el transporte, los edificios, la agricultura, la pequeña industria y los residuos.

Gracias al EU ETS y a la ESD, las emisiones de gases de efecto invernadero han disminuido drásticamente, pero sólo en sectores específicos. Como resultado, la tasa de participación del sector agro-forestal en las emisiones totales de CO₂ ha ido aumentando. Asimismo, la Estrategia Energética

2030 de la UE actualizada, (EC, 2014) establece objetivos aún más ambiciosos que los establecidos por la anterior Estrategia Energética 20-20-20, (EC, 2010). Los principales objetivos son una reducción del 40% de las emisiones de CO₂ en comparación con los niveles de 1990, al menos el 27% (revisión pendiente al 30%, según la petición del PE) de la energía, en base al consumo, procedente de material renovable y al menos el 27% de aumento de la eficiencia energética.

En este sentido, el sector LULUCF se contabilizará como un pilar independiente fuera de la ESD en el marco de la política climática y energética de la UE para 2030 (EC, 2016a). Además, la UE establece nuevas normas de contabilidad transparentes para las emisiones y absorciones del sector LULUCF en toda la UE (EC, 2012a; EC, 2012b; EC, 2016b). Existen varios estudios con proyecciones de las tendencias de las emisiones y absorciones del sector LULUCF aunque el estudio utilizado actualmente por la Comisión Europea es "EU energy, transport and GHG emissions, trends to 2050" (EC, 2014). En este escenario de referencia se espera que la cantidad de carbono almacenado en el sector LULUCF se mantenga hasta 2050, si bien se prevé que finalmente disminuya (EC, 2016c). El importante descenso como sumidero de carbono en los bosques gestionados se explica por la creciente demanda de productos de madera y bioenergía, que se traduce en un aumento de las cortas y en el descenso del sumidero forestal de carbono. Esto también está en consonancia con BOTTCHER et al. (2013), que proyecta una disminución significativa del sumidero hasta 2030 en el escenario de referencia de alrededor del 25 - 40% en comparación con la estimación de los modelos de 2010. Sin embargo, este descenso puede compensarse parcialmente aumentando los sumideros de carbono mediante la forestación, la disminución de la deforestación y el aumento del almacenamiento de carbono en los productos madereros (EC, 2016c). Las Áreas Marginales (en adelante AM) pueden desempeñar un papel importante como potenciales sumideros de carbono, ya que suponen una gran superficie con capacidad de forestación y reforestación y ningún efecto en el sector de la producción agroalimentaria. En general, se describen como tierras en las que no es posible la producción rentable de alimentos en las condiciones del lugar, es decir, condiciones ambientales, técnicas de cultivo, políticas agrícolas y las condiciones macroeconómicas y legales (STRIJKER, 2005; SCHROERS, 2006; KANG et al., 2013). Además, puede especificarse como tierra agrícola abandonada (FIELD et al., 2008), tierra degradada, tierra recuperada (DAUBER et al., 2012) y terreno baldío (WIEGMANN et al., 2008; OLDEMAN et al., 1991).

Según ALLEN et al., (2013), las tierras pueden considerarse marginales por diversas razones, como las económicas, las medioambientales, las agronómicas o cualquier combinación de ellas. Por lo tanto, es importante tener claro desde qué perspectiva se está evaluando la tierra como "marginal", si es o no marginal en otros términos, y si las consideraciones pertinentes son permanentes o sólo temporales.

Los cambios en la tecnología, la política y el clima dan lugar a un aumento o disminución de la marginalidad como cambio directo del uso de la tierra (LUC) y, por tanto, deben tenerse en cuenta. Por lo tanto, la definición de marginalidad de la tierra debe basarse en el entendimiento de que la calidad de la tierra cambia a través del espacio y el tiempo (KANG et al., 2013). El terreno puede ser categorizado como marginal para un propósito/cultivo específico, mientras que el mismo área, con los mismos atributos de calidad, puede ser categorizada como productiva cuando se establece un propósito diferente.

Una cantidad respetable de científicos y autoridades (FAO, 1993; BALDOCK et al., 1996; MILBRANDT & OVEREND, 2009; DALE et al., 2010; TANG et al., 2010; NRCS, 2010; GOPALAKRISHNAN et al., 2011), tienden a creer que el significado de AM tiene que ver con la incertidumbre, es cambiante, varía entre regiones, países y organizaciones, ajustándose a sus diferentes objetivos de gestión.

El uso de las AM como potenciales sumideros de carbono contribuirá a la eliminación de CO₂ y mejorará la tasa de impacto del sector agro-forestal en la reducción de los GEI. Las AM podrían ser

sitios adecuados para implementar proyectos de forestación/reforestación y, por lo tanto, nuevos sumideros potenciales de carbono sin entrar en competencia con la producción sostenible de alimentos de las tierras agrícolas. Para ello, la ubicación, la distribución espacial y la idoneidad de las AM deben evaluarse de forma eficiente, con cartografía temática para los responsables políticos, los agentes implicados y la comunidad investigadora. Las AM ubicados en tierras agrícolas más amplias que podrían caracterizarse como tierras en barbecho están fuera del alcance del proyecto MAIL, debido a la posible respuesta de los agricultores a nuevas oportunidades o técnicas de cultivo y a las complejas razones socioeconómicas.

El propósito es utilizar las técnicas de identificación (clasificación) y seguimiento con análisis de series temporales de las AM para su adecuada gestión con el fin de aplicar todas las políticas mencionadas y las decisiones estratégicas para implementar las dos acciones principales:

- i. Disminuir las emisiones globales de CO₂
- ii. Aumentar el secuestro de CO₂ en las AM

A través de políticas estrictas en la disminución de las emisiones de CO₂ y a través de la utilización prudente y avanzada de los bosques y las áreas forestales se logrará el equilibrio deseable entre emisiones/secuestros, como se describió en la reciente Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (COP 21).

Para ello, la ayuda de la teledetección por satélite, como ciencia que permite generar cartografía precisa, es crucial debido a los siguientes hechos:

1. La entrega gratuita de imágenes de alta resolución de la Teledetección

La decisión del Grupo de Observación de la Tierra (GEO) de entregar gratuitamente a todos los científicos el conjunto de imágenes de la misión Landsat aumentó el uso de la teledetección con fines medioambientales. La decisión fue anunciada en 2008 (USGS, 2015) y el PLAN DE ACCIÓN DE COMPARTICIÓN DE DATOS DEL GEOSS fue adoptado durante la Cumbre Ministerial del GEO en Beijing (GEO, 2014).

Además, todas las agencias espaciales internacionales están adoptando una entrega gratuita o de bajo coste de datos de observación de la Tierra a los científicos, incluida la ESA, que ha lanzado un conjunto de satélites de radar y de imágenes multiespectrales, bajo el nombre en clave de "Sentinel". Sentinel forma parte del programa Copérnico de la ESA, que apoya el plan de vigilancia medioambiental global.

2. El aumento de la resolución radiométrica, espacial y temporal de las imágenes de satélite.

El lanzamiento de sensores de satélites comerciales que tienen la capacidad de ofrecer imágenes de muy alta resolución espacial y simultáneamente pancromáticas con un gran número de bandas multi-espectrales está permitiendo la mejora de todos los servicios de análisis de teledetección. Además, la alta frecuencia de revisita, que puede ser tan baja como < 1 día, del satélite por encima de un área de interés (a 40° de latitud), es otra característica importante que está desempeñando un papel vital para la mejora de los servicios de Teledetección.

3. Los datos completos de acceso libre y gratuito (mapas temáticos o imágenes de satélite) de otras iniciativas de la UE y mundiales, en las que se estudiaron parámetros importantes como la cubierta terrestre, el suelo, la topografía, el clima, etc.

2. Objetivos

El principal objetivo del MAIL es potenciar la utilización de las AM como potenciales sumideros de carbono, con el fin de aumentar el secuestro de CO₂ en el sector LULUCF sin ningún impacto en el sector agroalimentario. Como objetivos específicos se encuentran:

Objetivo 1: Definición de los parámetros que describen las AM.

Objetivo 2: Selección de fuentes de datos adecuadas, teniendo en cuenta la escala global, europea y regional.

Objetivo 3: Implementación de series de procesamiento de datos para determinar la mejor alternativa para cartografiar/supervisar las AM, basándose en conjuntos de datos disponibles de forma gratuita, datos de satélite o aplicaciones de código abierto.

Objetivo 4: Cuantificación de la capacidad potencial de secuestro de CO₂ y de la utilización sostenible de las AM bajo el prisma del LULUCF.

Objetivo 5: Propuestas alternativas de posibles especies de vegetación que podrían ser utilizadas para el almacenamiento de CO₂ en las AM, considerando las condiciones limitantes del lugar. Se aplicará en estudios de casos piloto, representativos del Mediterráneo y de Europa Central y Oriental.

Objetivo 6: Creación de una base de conocimientos y un aula virtual en la web para la formación de los participantes en técnicas avanzadas de clasificación usando teledetección.

Objetivo 7: Establecimiento de un equipo de trabajo permanente formado por expertos en RS y Silvicultura que se centrará en la gestión de las AM a nivel de la UE.

Objetivo 8: Directrices generales y los manuales que atraigan y ayuden a los agentes implicados.

Objetivo 9: Difusión y comunicación de los objetivos del MAIL y de los resultados obtenidos hacia la comunidad científica, agentes implicados y el público en general.

3. Metodología

El proyecto se divide en paquetes de trabajo, transversales (requerimientos éticos, gestión del proyecto y diseminación) y específicos, cuyas tareas abordan diferentes fases: investigación, casos piloto donde poner en práctica las metodologías, técnicas y algoritmos desarrollados en la fase anterior, implementación de estas en herramientas y formación en ellas y estudios de sostenibilidad de proyectos relacionados con la forestación de tierras marginales (Figura 1).

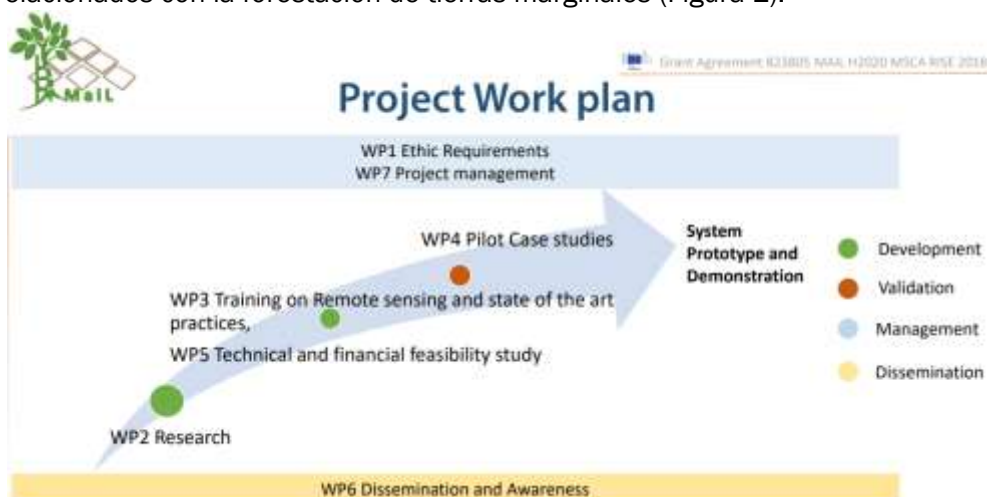


Figura 1. Metodología general del proyecto MAIL.

En la metodología propuesta se identifican las siguientes tareas:

- Definición del término AM de acuerdo a los objetivos del proyecto MAIL.
- Determinar los diferentes tipos de AM y sus requisitos mínimos para poder ser utilizados como sumideros de carbono.
- Identificar y evaluar las diferentes fuentes de datos disponibles a nivel europeo o global que pudieran utilizarse para localizar y producir indicadores de marginalidad.
- Primer nivel de clasificación: desarrollo de una metodología que identifique AM basado en información disponible de uso y cobertura de la tierra (LULC).
- Establecimiento de áreas piloto en diferentes partes de Europa.
- Evaluación de la primera clasificación y evaluación del carbono almacenado usando modelos existentes.

- Creación de un segundo nivel de clasificación con el uso de datos de teledetección y clasificación de las AM en categorías de acuerdo a su capacidad potencial de secuestro de carbono.
- Estimación y validación de los modelos de secuestro de carbono en los casos pilotos.
- Evaluación y comparación de series de datos de teledetección para el seguimiento de la identificación de las AM identificadas.
- Formación, información y diseminación del conocimiento a través de un MOOC (curso online abierto masivo) de las herramientas, metodologías y técnicas desarrolladas durante el proyecto.
- Desarrollo de una aplicación web con capacidades espaciales en el que se implementan los algoritmos de detección de áreas marginales (primera y segunda clasificación) y un sistema de ayuda a la decisión.
- Estudios de viabilidad de proyectos de forestación en AM y propuestas de uso para estas tierras.

Para **definir** el término de área marginal, después de una exhaustiva revisión bibliográfica, se decidió que la definición debía considerar las restricciones y objetivos propios del proyecto (excluir terrenos agrícolas, áreas protegidas y que las tierras identificadas pudieran ser usadas como sumideros de carbono), ante la falta de una definición común recogida en la legislación europea o comúnmente aceptada. Por tanto, se consideraron tierras marginales para el proyecto MAIL aquellas que cumplieran con estos criterios. (Figura 2)

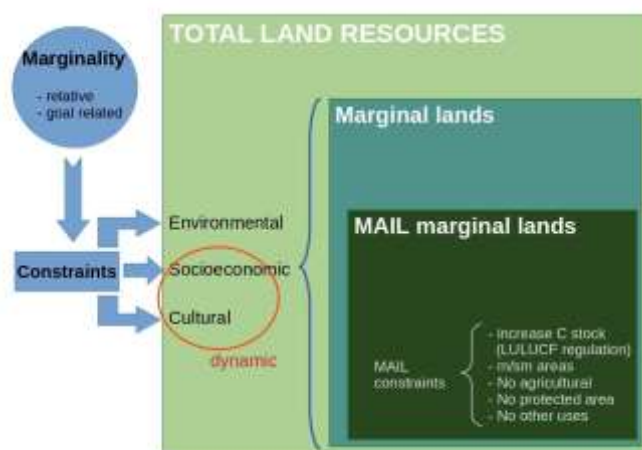


Figura 2. Diagrama conceptual de la definición de áreas marginales en el proyecto MAIL.

La **identificación y delimitación** de estas áreas se abordó con **dos enfoques diferentes**, en primer lugar, utilizando la información disponible de coberturas y uso de suelo y una serie de indicadores que permitiera una primera clasificación de estas áreas, lo que generó la primera metodología para esta identificación (Figura 3), y posteriormente, utilizando los resultados obtenidos anteriormente, se desarrolló otra metodología para esta identificación de áreas marginales mediante el uso de series multi-temporales de datos de teledetección y algoritmos desarrollados con técnicas de Machine Learning, obteniéndose una clasificación refinada de la anterior.

En el primer enfoque, la metodología empleada consistió en la combinación de datos de uso del suelo y datos de calidad del suelo. Los limitantes del uso del suelo se dividieron en dos: **'duros'** en el que se consideraba una **opción binaria para la exclusión o inclusión del pixel (si o no)**, como por ejemplo zonas agrícolas o protegidas (excluidas) y **'blandos'** que eran **factores con diferentes umbrales**, por ejemplo la pendiente. La metodología se dividió en cinco pasos. El primero fue el establecimiento de los criterios y umbrales para definir área marginal. El segundo fue la selección de las fuentes de datos y el pre-proceso de los datos. El tercer paso fue la implementación los limitantes

'duros' que implicaban la exclusión de todas las áreas que no cumplían con los requisitos de la definición propuesta en el proyecto, es decir, tierras agrícolas, terrenos arbolados, zonas impermeables (construidas), aguas y nieves permanentes, turberas, ciénagas. Se utilizaron diferentes fuentes de datos de coberturas y usos del suelo y se excluyeron aquellas coberturas que no cumplían con la definición. Finalmente se recogieron los cambios en la cobertura para actualizarlas al año de referencia 2018 (Tabla 1. Fuentes de datos implicados en los limitantes 'duros').

Tabla 1. Fuentes de datos implicados en los limitantes 'duros'

Fuente de datos	Acción en la que interviene
Sentinel2 Global Land Cover 2017	Exclusión de cuerpos de agua, nieve permanente, turberas y humedales
Global Forest Change Tree Cover loss 2018	Exclusión de áreas forestadas
Global Forest Change Tree Cover 2000 and 2015	Exclusión áreas forestadas
HRL Tree Cover Density	Exclusión áreas forestadas
CDDA + Natura 2000	Exclusión de áreas protegidas
Sentinel2 Global Land Cover 2017 artificial areas	Exclusión de áreas artificiales
CORINE artificial areas + HRL IMD	Exclusión de áreas artificiales
Sentinel2 Global Land Cover 2017 cultivated areas + CORINE croplands	Exclusión de áreas de cultivo
HRT Tree Cover Density Change, HRL IMD Change, CORINE change classes	Exclusión de áreas de cambio

En la cuarta fase se añadieron los criterios adicionales y umbrales basados en el desarrollo de conjuntos específicos de indicadores (limitantes 'blandos') y se realizó un análisis de superposición ponderada (Tabla 2).

Tabla 2. Indicadores considerados "blandos" usados para la clasificación de áreas marginales.

Indicador	Nº ocurrencias en la literatura	Ranking
pendiente	18	1
profundidad de raíces	18	1
pH	9	2
textura	9	2
erosión	8	3
pedregosidad	8	3
materia orgánica del suelo	8	3
capacidad de retención de agua	6	4
inundación	6	4
salinidad	5	5
limo	4	6
arena	4	6
contaminación	4	6

capacidad de intercambio catiónico	4	6
productividad	3	7
sequedad	2	8
toxicidad natural	1	9

El paso final fue la reclasificación del producto resultante de la superposición en tres clases, representando el grado de marginalidad. El resultado es la cartografía de áreas marginales (limitantes ‘duros’) y el mapa de marginalidad (limitantes ‘blandos’) a escala europea se puede encontrar en la aplicación del proyecto: <http://marginallands.eu/>



Figura 3. Metodología de identificación de áreas marginales basada en la definición de restricciones fuertes (izquierda) y restricciones blandas (derecha).

La metodología basada en la definición de limitantes duros y blandos está basada en datos de cobertura de suelo disponibles de capas de 2017-2018. Posteriormente se desarrolló **otra metodología** que pudiera, utilizando imágenes satélites disponibles, aprovechar la alta resolución espacial y temporal de las misiones actuales. Se trata esencialmente de un algoritmo de clasificación supervisada. El clasificador supervisado Random Forest fue el utilizado, y la metodología usó las colecciones de imágenes Sentinel-1 (GRD) y Sentinel-2 (SR, L2A), y como datos de entrenamiento, a falta de datos terreno, se usaron los resultados obtenidos en la anterior metodología. En este caso, la herramienta acepta por parte de usuario final la determinación de las fechas de estudio (con una separación entre ellas de 2 años) en la que analizar el terreno para identificar AM y da un resultado refinado del obtenido solo con el primer enfoque. Esta segunda metodología también está implementada en la herramienta creada en la plataforma de Google Earth Engine

La **evaluación de la precisión** es el paso final que permite verificar la exactitud de los resultados. Para la cartografía resultante de la primera clasificación, específicamente el resultado de aplicar los limitantes ‘duros’, se desarrolló una metodología de evaluación mediante la generación de una matriz de error que compara la capa clasificada con datos reales de referencia usando una evaluación basada en puntos y basada en área. El primero se desarrolló mediante puntos aleatorios estratificados y el segundo mediante la intersección de dos capas. Se comparó el área predicha por la metodología con polígonos de referencia aportado por los socios del proyecto y se cuantificó la desviación de las AM predichas para los sitios dados respecto de la verdad terreno. Las métricas de precisión fueron la precisión global (OA), la precisión del usuario (UA), la precisión del productor (PA), la tasa de error (ERR), el coeficiente de correlación de Matthew (MCC), el coeficiente Kappa y la puntuación F1.

Teniendo en cuenta que el concepto de área marginal es dinámico en el tiempo se desarrolló otra metodología para la **detección de cambios** en estas áreas, considerándose los posibles escenarios de deforestación de un área, la restauración o el no cambio. Este desarrollo está basado en el algoritmo de segmentación temporal LandTrendr (KENNEDY et al., 2018), diseñado para identificar cambios en la firma espectral de un pixel en una serie temporal de imágenes del satélite Landsat. Finalmente se personalizó la parametrización del mismo para adaptarse a los objetivos del proyecto.

Una vez identificados las potenciales áreas marginales a nivel europeo o local, siguiendo los objetivos del proyecto se trabajó para estimar, en la medida que la escala europea de trabajo lo permitía, la oportunidad que representaban como **sumideros de carbono**. En este sentido todas las áreas identificadas como marginales se clasificaron en grupos según la capacidad de secuestro de carbono. El análisis se realizó a dos escalas de trabajo: europea y local. En la local, esta clasificación se fundamentó en la definición de dos parámetros, la Capacidad de Carga de Carbono (CCC), entendida como la capacidad máxima teórica de una AM de fijar CO₂, y el Secuestro Actual de Carbono (SAC). Por lo tanto, la capacidad de secuestro de carbono se definió como la diferencia entre CCC y SAC. A escala local el CCC se definió proyectando el crecimiento de unas reforestaciones teóricas en AM con tablas de producción y ecuaciones de biomasa, mientras que el SAC se estimó empleando algoritmos *machine learning* sobre datos LiDAR, Sentinel 2 y ecuaciones de biomasa calibradas con LiDAR terrestre. Para el modelo europeo el CSC se estimó considerando los valores medios de biomasa que rodeaban a un área marginal y se multiplicaron por su productividad (calculada a través de la capa de limitantes 'blandos').

En las simulaciones que se hicieron en las áreas pilotos para la estimación de la capacidad de secuestro de carbono, se utilizaron los siguientes criterios: para la selección las especies forestales se consideraron las más representadas en esas áreas de acuerdo con los inventarios nacionales o los regionales (Tabla 3), y para las tablas de producción, las ecuaciones de biomasa y los valores de densidad de la madera también se utilizaron los estudios disponibles a nivel regional, de forma que fueran los más adaptados a las áreas piloto. Las simulaciones se hicieron a 50 años de horizonte temporal.

Tabla 3. Resumen de las principales especies seleccionadas para cada país en las áreas piloto.

País	Especies	Fuente
Alemania	<i>Pinus sylvestris</i> <i>Picea abies</i>	Inventario Nacional Forestal de Alemania
Polonia	<i>Pinus sylvestris</i> <i>Quercus spp.</i>	Inventario Nacional Forestal Polaco Banco de datos Forestales
España	<i>Pinus pinaster</i> <i>Pinus nigra</i> <i>Pinus sylvestris</i> <i>Pinus halepensis</i>	Mapa Forestal de España E 1/50.000
Grecia	<i>Pinus halepensis</i> <i>Quercus frainetto</i>	Inventario de los sitios piloto

4. Resultados

El presente documento se centra en los resultados obtenidos en los objetivos de definición de área marginal, identificación de áreas marginales a escala europea y en su cuantificación como posibles sumideros de carbono.

En la búsqueda para la **definición** de área marginal se encontraron 30 definiciones diferentes que consideraban restricciones ambientales, económicas o ambas. Finalmente se definió área marginal en el contexto del proyecto MAIL en línea con los objetivos del proyecto como sigue: 'tierras con limitaciones significativas, ya sean ambientales (variables biofísicas) o socioeconómicas, y con potencial para influir en la contabilidad nacional de las existencias de carbono, excluyendo tierras agrícolas y otras zonas valiosas (zonas protegidas, usos con importancia local, etc.). Se consideran el dinamismo y la variabilidad como conceptos claves para la identificación de estas tierras. Algunos ejemplos de estas zonas son, entre otros, las tierras degradadas y/o abandonadas, las tierras con una productividad naturalmente baja debido a limitaciones biofísicas, y otras tierras degradadas que

(todavía) no se han convertido a otros usos, por ejemplo, los emplazamientos postindustriales y postmineros. En un enfoque complementario, plenamente coherente con los objetivos del proyecto MAIL, consideraremos Áreas Marginales aquellas cuyo uso del suelo permite, según las normas de contabilidad referidas en el compromiso de la UE y el reglamento desarrollado (DOUE, 2018) y las categorías de uso del suelo propuestas por las directrices del IPCC de 2006 (IPCC. (2006)), maximizar el aumento de las reservas de carbono. Es decir, el proyecto MAIL se centrará en las áreas en las que es posible convertirlas en tierras forestales (Land Converted to Forest Land: tierras forestadas). Por lo tanto, se pueden considerar Áreas Marginales, pastizales (incluyendo sistemas con vegetación leñosa que no cumplan con los valores mínimos de las variables especificadas en el Anexo II para cada país), tierras de cultivo abandonadas u otras tierras (suelo desnudo, roca, hielo, etc.), excluyendo de ellas aquellas con actividad socioeconómica, de protección ambiental o con restricciones legislativas.'

En cuanto a **la identificación de las AM** en Europa, en la Tabla 4 se muestra la superficie identificada como tal en cada uno de los países involucrados en el proyecto de acuerdo a la metodología diseñada con limitantes duros y blandos.

Tabla 4. Superficie de AM identificadas sobre el total por país.
Superficie total del país (km²) Superficie de AM (km²) AM sobre el total (%)

	Superficie total del país (km ²)	Superficie de AM (km ²)	AM sobre el total (%)
España	505.970	100.983	19,96
Grecia	132.049	24.770	18,76
Alemania	367.340	41.606	11,64
Polonia	312.679	22.442	7,18

La **precisión** obtenida en la identificación de AM a escala europea se puede observar a continuación (Tabla 5). Las técnicas utilizadas fueron una evaluación por puntos y otra por áreas.

Tabla 5. Métricas obtenidas de la precisión en la identificación de AM.

Métrica	Grecia		España		Alemania		Polonia		Combinado	
	Punto	Área	Punto	Área	Punto	Área	Punto	Área	Punto	Área
OA (%)	71,52	70,75	82,87	83,42	60,61	59,79	90,97	90,56	67,98	67,73
UA (%)	77,73	76,86	77,47	77,98	3,62	3,53	92,41	90,74	42,69	42,40
PA (%)	73,89	73,58	84,66	85,45	90,06	88,60	54,17	52,79	75,36	74,87
F1	75,76	75,19	80,90	81,54	6,96	6,78	68,30	66,75	54,50	54,14
ERR (%)	28,48	29,25	17,13	16,58	39,84	40,21	9,03	9,44	32,02	32,27
KAPPA	0,41	0,40	0,65	0,67	0,04	0,04	0,64	0,62	0,33	0,32
MCC	0,41	0,40	0,66	0,67	0,13	0,13	0,67	0,65	0,36	0,35

La clasificación subestimó las AM en los polígonos de referencia de Grecia en 341 ha, y en Polonia en 225 ha. Sin embargo, en España la clasificación desarrollada sobrestimó las AM en 158 ha en España y en 8.469 ha en Alemania.

Las simulaciones de la **capacidad de secuestro de carbono** que se llevaron a cabo dieron los siguientes resultados de fijación por especie a 50 años, Tabla 6:

Tabla 6. Fijación de carbono por especie en las áreas piloto del estudio.

País	Área piloto	Especies	Fijación CO ₂ (t/ha)
Alemania	Notchen y Welzow (Saxony)	<i>Picea abies</i>	148.3
		<i>Pinus sylvestris</i>	109.7
Polonia	Staszów (Świętokrzyskie Voivodeship)	<i>Quercus spp.</i>	63.6
		<i>Pinus sylvestris</i>	52.9
España	Tierras altas (Soria)	<i>Pinus nigra</i>	157.9
		<i>Pinus sylvestris</i>	108.2

	Nogueruelas (Teruel)	<i>Pinus pinaster</i>	108.1
		<i>Pinus halepensis</i>	88.2
Grecia	Rhodope (Komotini) y kedrinos Lofos (Thessaloniki)	<i>Pinus halepensis</i>	88.2
		<i>Quercus frainetto</i>	72.0

Se estimó también las posibilidades de secuestro de carbono en los **productos derivados** de potenciales proyectos de restauración forestal para las áreas piloto del proyecto. Se observó que el carbono almacenado en los productos forestales maderables (PFM) depende de su vida útil, que viene determinada por su tipo. A su vez la producción de PFM depende del AM, que también condiciona el momento de cosecha. Cuando los PFM son de vida corta (por ejemplo, en Grecia), el bosque establecido actúa como sumidero de carbono hasta la tala final y, a continuación, se convierte en fuente de carbono, ya que los PFM producen emisiones poco después de su recolección. En el caso de España, donde las AM pueden llegar a producir tableros de madera y la madera en sierra, los PFM podrían llegar a almacenar al menos 1 tonelada de C/ha durante aproximadamente 200 años después de la tala final.

En los casos de Alemania y Polonia, los productos de madera aserrada almacenarán un valor más alto de carbono, debido a una mayor producción y una selección de especies con mayor almacenamiento de carbono (*Quercus* sp y *Picea abies*). En base a esto, los productos de madera de estas áreas, pueden almacenar al menos 1 tonelada C/ha durante aproximadamente 700 años después de la tala final.

En el marco del proyecto se ha publicado una síntesis de la propuesta de metodología para la identificación de AM desarrollada en el proyecto (TORRALBA et al., 2021) y sobre el uso de teledetección para el seguimiento y cuantificación del secuestro de carbono en AM (CARBONELL-RIVERA et al., 2021).

Finalmente, como resultado práctico del proyecto, los principales resultados se implementaron utilizando la plataforma de Google Earth Engine con una caja de herramientas orientado a la identificación de las potenciales áreas marginales en Europa, de acuerdo a las dos metodologías desarrolladas, y otra orientada a la ayuda en la toma de decisiones, incluyendo la estimación del potencial de secuestro de carbono (Figura 4). Este potencial se estima asumiendo que el AM objetivo va a ser reforestada, para ello el usuario selecciona las especies a emplear (máximo 3) y se predice su crecimiento diamétrico empleando la metodología propuesta por SCHELHAAS et al. (2018). Esta metodología calibra ecuaciones de crecimiento específicas para cada especie considerando variables ambientales, topográficas y climáticas. Como resultado obtenemos una curva de diámetros normales por especie y área. Después, para convertir estos valores en carbono, estos valores diamétricos se aplican a las ecuaciones generalizadas de biomasa de FORRESTER et al. (2017) y finalmente multiplicamos este valor por proporción aproximada de carbono en la madera para esa especie.

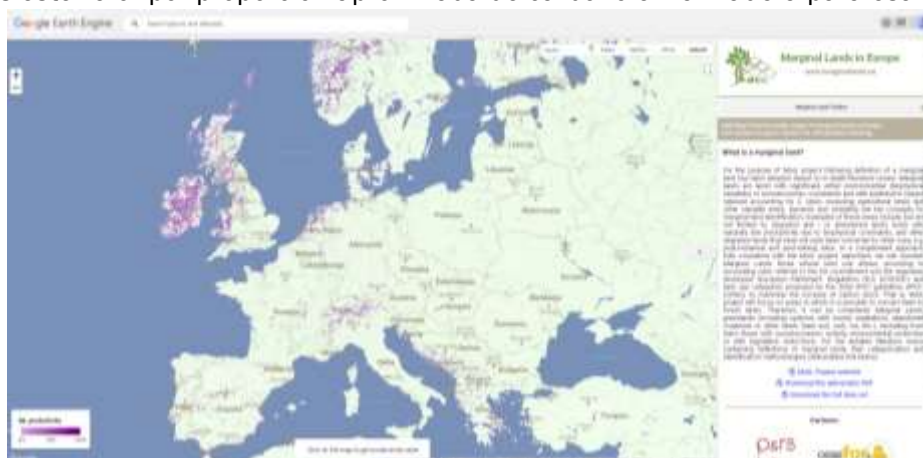


Figura 4. Visualización de la aplicación web del proyecto MAIL.

5. Discusión

Las áreas marginales constituyen una oportunidad para la implantación de proyectos de restauración, incluido la forestación/reforestación de estas tierras, que pueden ayudar a la lucha contra el cambio climático, específicamente como acciones de mitigación, pero no exclusivamente.

No todos los proyectos de restauración tienen que ser restauraciones forestales, y desde luego en aquellos casos en que así se aconseje, se debería fijar como objetivo prioritario el cumplimiento de la multifuncionalidad de los nuevos bosques. Estos proyectos de reforestación, uno de cuyos objetivos, que no único, es convertir estas zonas en sumideros de carbono, deben llevarse a cabo siguiendo los principios establecidos en la nueva estrategia forestal europea para 2030 (EC, 2021), entre cuyos objetivos se encuentra la mejora de la biodiversidad y una gestión forestal integrada, promocionando una gestión de cobertura continua que incremente la diversidad de especies y la conservación de los bosques mientras incrementa el valor de la cadena de la madera.

Tras una exhaustiva revisión bibliográfica realizada en el proyecto, se obtuvieron varias conclusiones acerca de la definición de Área Marginal: (i) no hay establecido una definición como tal a nivel europeo, y (ii) la definición difiere de acuerdo con el objetivo final del proyecto para el que se realiza dicha definición.

El concepto de marginalidad es un concepto vago y no está recogido actualmente en la legislación a nivel europeo, siendo las áreas menos favorecidas (LFA según sus siglas en inglés), definidas como las áreas montañosas o áreas con restricciones naturales para el cultivo (falta de agua, condiciones climáticas adversas, periodo de crecimiento corto) o áreas remotas con acceso reducido o en riesgo de despoblación (PORQUEDDU et al., 2017), el concepto más cercano, lo que dificulta también una definición común. En las diferentes definiciones se pueden utilizar conceptos socioeconómicos (IVANINA et al., 2016) o mezcla de factores ambientales y socioeconómicos (JIANG et al. 2019; MEHRETU et al, 2000).

En España, Grecia y Polonia, la mayor parte de las AM se encontraron sobre la clase de cubierta Herbácea del S2GLC map, mientras que en Alemania fue en la clase Páramos y Brezales.

La precisión de las AM detectadas vino determinada por las siguientes causas (i) las fuentes de datos utilizadas para la delimitación de los limitantes ‘duros’ (exclusión o inclusión de las áreas) no son 100% precisas, (ii) la metodología de la detección de áreas marginales se basaron en fuentes de datos disponibles con fecha de referencia 2017, mientras que la validación se hizo con datos de 2021, y (iii) las áreas de validación variaron en cantidad y método de adquisición por cada país de los socios del proyecto (Grecia, Polonia, Alemania y España), lo que podría explicar en parte que la precisión varió mucho entre las detectadas en Alemania y el resto, siendo Polonia, España y Grecia, en este orden, las que mejor resultado obtuvieron. Las diferencias en las medidas de precisión entre los países se podrían equilibrar mediante la derivación de un procedimiento estándar y las mediciones sobre el terreno de las áreas de validación.

La precisión de la clasificación con teledetección obtuvo cifras similares a la anterior metodología, pero no la consiguió sobrepasar en términos de métricas de precisión. Estos resultados se achacan a la calidad de los datos de entrenamiento para la clasificación de AM, ya que ante la imposibilidad de muestreo en campo en el marco del proyecto, y por tanto, la utilización de verdad-terreno, se utilizaron parte de los datos de la clasificación anterior como datos de referencia. En cualquier caso se manifestó como una herramienta suficientemente fiable para la detección de AM.

La utilización del algoritmo LandTrendr se mostró eficaz para detectar cambios en la cobertura del suelo con una precisión suficiente para los objetivos del proyecto. Con una correcta personalización de los parámetros, se pueden localizar fenómenos como la deforestación o forestación de áreas (HURTADO y LIZARADO, 2019), que permite en este caso el seguimiento de las

áreas, que de acuerdo con los objetivos del proyecto MAIL, se consideran marginales y que entre otros factores se definen por zonas continuas sin arbolado. Más complejo se antoja la detección de intervenciones silvícolas como claras o clareos, como apunta THOMAS et al. (2011).

En cuanto a las fijación de carbono por especies calculada en el estudio de la capacidad de secuestro de carbono en las áreas piloto, los resultados tan diferentes para la misma especie viene determinado, en gran medida, por las tablas de producción locales empleadas, que consideran diferentes valores de densidad inicial, y de la selvicultura aplicada, con densidades a 50 años muy diferentes.

6. Conclusiones

La identificación y cartografía de áreas marginales a una escala global puede permitir el establecimiento de políticas que aborden la lucha contra el cambio climático, y a su vez abren una ventana de oportunidad para la reactivación económica de zonas rurales mediante la creación de nuevas superficies forestales, siempre y cuando se potencie la multifuncionalidad de los montes, se haga un seguimiento y se mantenga la gestión en el tiempo de las masas resultantes.

La utilización de teledetección como fuente para su cartografía, incluso sin trabajo de verdad terreno, es factible y permite, gracias a la actual disponibilidad de datos y plataformas, el monitoreo de estas zonas, pero es indudable que la calidad de los datos de entrenamiento tiene una relación directa con la calidad y precisión de la cartografía resultante de aplicar clasificadores a este tipo de datos. También es posible el seguimiento a lo largo del tiempo utilizando algoritmos de detección de cambio ya desarrollados si se consigue una buena parametrización de acuerdo a los objetivos buscados.

Los resultados de las estimaciones de secuestro de carbono, tanto de la capacidad potencial de las AM, como de los productos derivados de posibles actuaciones en ellos, deben ser considerados como aproximaciones que ponen en relieve la gran cantidad de terreno susceptible de utilización para la lucha contra el cambio climático, pero debido a la escala de trabajo, los modelos y ecuaciones utilizados para su estimación adolecen de la precisión de los modelos de crecimiento que se pueden usar a escala local.

7. Agradecimientos

El proyecto MAIL ha sido financiado por el programa de investigación e innovación Horizon 2020 de la UE Marie Skłodowska-Curie N° 823805 [H2020 MSCA RISE 2018] y ha contado con un presupuesto de 800.400€.

Especial agradecimiento a los socios colaboradores del proyecto: Universidad Aristotélica de Tesalónica (Coordinador), Homeotech, Universidad Politécnica de Valencia, IAGB, Centro de Investigación Espacial de la Academia de Ciencias Polaca y Cesefor, así como a sus responsables, técnicos e investigadores involucrados en el proyecto.

8. Bibliografía

ALLEN, B.; KRETSCHMER, B.; KIEVE, D.; SMITH, C.; BALDOCK, D.; 2013. Biofuels and ILUC – Q&A: Answers to common questions surrounding the ILUC debate. *Biofuel ExChange briefing* No 5, Institute for European Environmental Policy, London

BALDOCK, D.; BEAUFOY, G.; BROUWER, F.; GODESCHALK, F.; 1996. Farming at the margins. London, UK: The Hague, IEEP, LEI-DLO

BÖTTCHER, H.; VERKERK, P.J.; GUSTI, M.; HAVLÍK, P.; GRASSI, G.; 2012. Projection of the future EU forest CO₂ sink as affected by recent bioenergy policies using two advanced forest management models. *GCB Bioenergy* 4, 773- 783. EC. 2014. EU energy, transport and GHG emissions, trends to 2050 - Reference scenario 2013

CARBONELL-RIVERA, J.; ESTORNELL, J.; RUIZ, L; ABAD, A.; FELTEN, B.; TORRALBA, J.; 2021. A review of the use of remote sensing for monitoring and quantifying carbon sequestration in marginal lands. 10.4995/CiGeo2021.2021.12694.

DALE, V.; KLINE, K.; WIENS, J.; FARGIONE, J.; 2010. Biofuels: Implications for Land Use and Biodiversity. *Biofuels and Sustainability Reports*, 1-13.

DAUBER, J.; BROWN, C.; FERNANDO, A. L.; FINNAN, J.; KRASUSKA, E.; PONITKA, J., ... ; ZAH, R.; 2012. Bioenergy from “surplus” land: environmental and socio-economic implications. *BioRisk*, 7, 5.

EC; 2010. A strategy for smart, sustainable and inclusive growth. European Commission.
DOUE; 2018. Reglamento (UE) 2018/841 del Parlamento Europeo y del Consejo de 30 de mayo de 2018 sobre la inclusión de las emisiones y absorciones de gases de efecto invernadero resultantes del uso de la tierra, el cambio de uso de la tierra y la silvicultura en el marco de actuación en materia de clima y energía hasta 2030, y por el que se modifican el Reglamento (UE) n. o 525/2013 y la Decisión n. o 529/2013/UE.

EC; 2014. A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030. European Commission.

EC; 2015. Climate action progress report 2015. European Commission.

EC; 2016a. Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry into the 2030 climate and energy framework and amending Regulation No 525/2013 of the European Parliament and the Council on a mechanism for monitoring and reporting greenhouse gas emissions and other information relevant to climate change. European Commission.

EC; 2016b. COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT Accompanying the document Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry into the 2030 climate and energy framework and amending Regulation No 525/2013 of the European Parliament and the Council on a mechanism for monitoring and reporting greenhouse gas emissions and other information relevant to climate change. European Commission.

EC; 2016c. Agriculture and LULUCF in the 2030 Framework Final Report Submitted by ICF Consulting Limited, Alterra, COWI, Ecologic Institute and Umweltbundesamt GmbH 3 May

2016. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2016 ISBN 978-92-79-59123-5. European Commission.

EC; 2021. COM(2021) 572 final. Communication from the commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee and the committee of the Regions. New EU Forest Strategy for 2030. Bruselas, 16.7.2021. European Commission.

EEA; 2014. Total Greenhouse Gas (GHG) emissions trends and projections. European Environment Agency.

EUROPEAN PARLIAMENT. Regulation (EU) 2018/841 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the inclusion of greenhouse gas emissions and removals from land use, land use change and forestry in the 2030 climate and energy framework., 2018 Official Journal of the European Union (2018).

EUROSTAT; 2015a. Smarter, greener, more inclusive. Indicators to support the Europe 2020 strategy

EUROSTAT; 2015b. Energy, transport and environment indicators

FIELD C.B.; CAMPBELL J.E.; LOBELL D.B.; 2008. Biomass energy: the scale of the potential resource. *Trends in Ecology and Evolution* 23: 65–72.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF UNITED NATIONS (FAO); 1993. FESLM: an international framework for evaluating sustainable land management. *World Resources Report*, 73, FAO, Rome, Italy

FORRESTER, D. I.; TACHAUER, I. H. H.; ANNIGHOEFER, P.; BARBEITO, I.; PRETZSCH, H.; RUIZ-PEINADO, R.; SILESHI, G. W.; 2017. Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. *Forest Ecology and Management*, 396, 160-175.

GEO: Group on Earth Observation. GROUP ON EARTH OBSERVATION. Meeting and Events: Summits [online]. 2014. [cit. 2015-04-20].

GOPALAKRISHNAN, G.; NEGRI, C.; SNYDER, S.; 2011. A Novel Framework to Classify Marginal Land for Sustainable Biomass Feedstock Production. *J. Environ. Qual*, 40, 1593-1600

HURTADO, L.; LIZARAZO, I.; 2019. Identification of disturbances in the Colombian tropical rainforest from Landsat satellite image time series using the Landtrendr algorithm. *Revista de Teledetección*, [S.l.], 54, 25-39, ISSN 1988-8740.

IVANINA, V.; ROIK, M.; HANZHENKO, O.; 2016. Report on MagL concepts, debate and indicators (D2.3). In SEEMLA project reports, supported by the EU's Horizon 2020 programme under GA No. 691874.

IPCC; 2006. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use Chapter 4 forest land 2006. *Forestry*.

TORRALBA, J.; RUIZ, L.; GEORGIADIS, C.; PATIAS, P.; GOMEZ, R.; VERDE, N.; TASSOPOULOU, M.; BEZARES, F.; GROMNY, E.; ALEKSANDROWICZ, S.; KRAETZSCHMAR, E.; KRUPINSKI, M.; CARBONELL-RIVERA, J.; 2021. METHODOLOGICAL PROPOSAL FOR THE IDENTIFICATION OF MARGINAL LANDS WITH REMOTE SENSING-DERIVED PRODUCTS AND ANCILLARY DATA. 10.4995/CiGeo2021.2021.12729.

JIANG, W.; JACOBSON, M. G.; LANGHOLTZ, M. H.; 2019. A sustainability framework for assessing studies about marginal lands for planting perennial energy crops. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 13(1), 228–240.

KANG, S.; POST, W.; NICHOLS, J.; WANG, D.; WEST, T.; BANDARU, V.; IZAURRALDE, R.; 2013. Marginal Lands. Concept, Assessment and Management. *Journal of Agricultural Science*, 5, 129-139

KENNEDY, R.; YANG, Z; GORELICK, N.; BRAATEN, J.; CAVALCANTE, L.; COHEN, W.; HEALEY, S.; 2018. Implementation of the LandTrendr Algorithm on Google Earth Engine. *Remote Sensing* vol.10 1-10.

MEHRETU, A.; PIGOZZI, B. W.; SOMMERS, L. M.; 2000. Concepts in Social and Spatial Marginality. *Geografiska Annaler, Series B: Human Geography*, 82B(2), 89–101.

MILBRANDT, A.; OVEREND, R.; 2009. Assessment of biomass resources from marginal lands in APEC economics. The APEC Energy Working Group under EWG, 11/2008^a

NASA: LANDSAT SCIENCE. NASA. Group on Earth Observations Heralds Free, Global Access to USGS Earth Imagery [online]. 2015 [cit. 2015-04-20].

OLDEMAN, L.R; HAKKELING, R.T.A; SOMBROEK, W.G1991. World map of the status of human-induced soil degradation: an explanatory note; International Soil Reference and Information Centre/UNEP; Wageningen/Nairobi

PORQUEDDU, C.; MELIS, R.A.M.; FRANCA, A.; SANNA, F.; HADJIGEORGIOU, I.; CASASÚS PUEYO, I.; 2017. The role of grasslands in the less favoured areas of Mediterranean Europe. *19th European Grassland Federation Symposium: Grassland resources for extensive farming systems in marginal lands: major drivers and future scenarios*, Alghero, Sardinia (Italy), 7-10 May 2017

SCHELHAAS, M.J.; HENGEVELD, G.M.; HEIDEMA, N.; 2018. Species-specific, pan-European diameter increment models based on data of 2.3 million trees. *For. Ecosystems*. 5, 21.

SCHROERS, J.; 2006. Towards the development of marginal land use depending on the framework of agricultural market, policy and production techniques. University of Giessen, Germany

STRIJKER, D.; 2005. Marginal lands in Europe - causes of decline. *Basic Appl. Ecol.*, 6, 99-106.

NRCS; 2010. National soil survey handbook. 430.VI. United States Department of Agriculture-Natural Resources Conservation Services.

USGS: USGS NEWSROOM. U. S. GEOLOGICAL SURVEY. Group on Earth Observations Heralds Free, Global Access to USGS Earth Imagery [online]. 2015 [cit. 2015-04-20]. Available from:

TANG, Y.; XIE, J.; GENG, S.; 2010. Marginal land-based biomass energy production in China. *Journal of Integrative Plant Biology*, 52, 112-121

THOMAS, N.; HUANG, C.; GOWARD, S.N.; POWELL, S.; RISHMAWI, K.; SCHLEEWEIS, K.; HINDS, A.; 2011. Validation of North American Forest Disturbance dynamics derived from Landsat time series stacks. *Remote Sensing of Environment*, 115, 19-32

WIEGMANN K.; HENNENBERG K.J.; FRITSCH U.R.; 2008. Degraded Land and Sustainable Bioenergy Feedstock Production. *Issue Paper of the Joint International Workshop on High Nature Value Criteria and Potential for Sustainable Use of Degraded Lands*, Paris. Oeko-Institut (Darmstadt): 1-10.