

MASTER EN
TECNOLOGÍAS
AVANZADAS PARA EL
DESARROLLO
AGROFORESTAL

TRABAJO FIN DE MÁSTER

Evaluación mediante sensores remotos del impacto de las medidas silvícolas en Obaga de Coll de Deu (Lérida) en el vigor de la masa



Universidad de Valladolid

Alumna: María Eugenia

Martínez Tottil

Tutor: Salvador Hernández

Directores: Luis Carlos Fernández

Luis Fernando Sánchez Sastre



Agradecimientos

A Dios y María, gracias por tantas bendiciones.

A quienes siempre confiaron en mí y me dieron su apoyo en todas mis decisiones, mis padres Gilberto y Marianela. Muchas gracias porque sin ustedes este anhelo no podría haberse cumplido.

A mi familia, especialmente a mis hermanos, Fernando y Verónica, a mis sobrinos, Juangi y Valentina, a Natalia, a Pamela y a mis amigos, quienes desde lejos me dieron su apoyo siempre.

A la Fundación Carolina y la Universidad de Valladolid, por permitirme acceder al Máster.

A Luis Carlos Fernández, un agradecimiento especial, por todos los conocimientos transmitidos, por la paciencia y el tiempo dedicado para la culminación del presente trabajo.

A mi tutor, Dr. Salvador Hernández, por la confianza puesta en mí para llevar a cabo la presente investigación y por los conocimientos y ayudas otorgadas para el enriquecimiento de este estudio. A Luis Fernando Sánchez, Enrique Relea, y demás profesores del máster.

A quienes me hicieron sentir como en casa, quienes me brindaron su cariño y apoyo en todo momento, Laiana, Sandra, Vanesa y Armandine, gracias.

A quien siempre estuvo ahí dándome fuerzas y todo su apoyo para vencer todos los desafíos, David, muchas gracias.



ÍNDICE

Resumen.....	1
1. Introducción.....	1
2. Antecedentes	3
3. Material y métodos	4
3.1. Caracterización del área de estudio	4
3.2. Programas informáticos utilizados para el estudio.....	6
3.3. Satélites seleccionados.....	6
3.4. Imágenes satelitales utilizadas	7
3.5. Preprocesamiento de imágenes satelitales	9
3.6. Extracción de datos de Índices de Vegetación	11
3.7. Mapeamiento y Layout.....	13
4. Resultados y discusión.....	13
4.1. 28 de julio de 2010.....	13
4.2. 31 de julio de 2014.....	14
4.3. 6 de julio de 2015.....	14
4.4. 7 de julio de 2016.....	14
4.5. 12 de junio de 2017.....	14
4.6. Evolución de la zona de estudio entre los años 2010 a 2017	15
4.7. Evolución de la vegetación por categorías	17
5. Conclusiones.....	19
Referencias	20
ANEXOS	25



Resumen

El presente trabajo expone los resultados obtenidos tras el estudio temporal (2010-2017) del vigor vegetativo de un bosque ubicado en la Muntanya d'Alinyà (Llérida), Cataluña para evaluar el éxito de las medidas silvícolas para aumentar fijación de carbono ejecutadas en 2015 como parte del proyecto LIFE11 ENV/ES/535 – Operation CO₂. El vigor vegetativo se ha estudiado a partir de índices de vegetación determinados a partir de imágenes satelitales Landsat 7, 8 y Sentinel-2. Se ha concluido que los sensores de media y alta resolución utilizados se adecúan para el cumplimiento del objetivo propuesto. Se puede observar un mejoramiento en el vigor vegetativo dos años después de las acciones implementadas y se propone una metodología para futuras investigaciones.

Palabras claves: teledetección, Landsat 7, Landsat 8, Sentinel-2, NDVI, SAVI, vigor vegetativo, medidas silvícolas.

1. Introducción

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) puso de manifiesto que un incremento en las temperaturas medias globales y mayores eventos de sequía podrían afectar ciertos ecosistemas forestales (IPCC 2014 a).

Los bosques que se verán especialmente afectados son aquellos que se encuentran en zonas más calientes y dónde se percibirán las condiciones climáticas más extremas, como es el caso de la zona Mediterránea. Según García-Güemes y Calama (2015) en la Península Ibérica la vegetación incrementará su evapotranspiración potencial y con una disminución de la precipitación, aumentará también el régimen hídrico generando una serie de impactos tales como: el desplazamiento o migración de especies forestales, extinción o sustitución de especies, decaimiento forestal (reducción del crecimiento, pérdida de vigor vegetativo, defoliación, mortalidad, etc.), mayor vulnerabilidad a ataques de plagas de insectos y hongos, mayores perturbaciones abióticas (por ej. incendios) y cambios en la productividad primaria neta.

En España, según investigaciones realizadas, un género que puede ser susceptible de tal situación es el pino, que ha sufrido un decaimiento, y que podría tener su causa, en el contexto de cambio climático anteriormente presentado, en la que hongos o parásitos aprovechan la debilidad de las masas para actuar con mayor virulencia, junto con otros



factores tales como los manejos silvícolas que puede condicionar su vulnerabilidad a los mencionados ataques. Así también, se ha observado que en la Península Ibérica las masas forestales han aumentado su densidad, pero que tras alcanzar el máximo compatible, empiezan a perder vigor debido a que existe una alta competencia por los recursos hídricos, aumentando así la mortalidad de los árboles (García-Güemes y Calama 2015, Serrada et al. 2011).

Sin embargo, hay que considerar que los árboles presentan una capacidad inherente para adaptarse a nuevas condiciones ambientales que pueden ser resultado de una serie de procesos evolutivos y de desarrollo de mecanismos, así como también de factores socioeconómicos, como la silvicultura (Lindner et al. 2010). Estas medidas generalmente consisten en tratamientos silvícolas que buscan imitar, ayudar o promover los procesos naturales de adaptación de los bosques (Rodríguez-Soalleiro et al. 2009). En España se tiene experiencia en cuanto a medidas silvícolas de adaptación al cambio climático, como por ejemplo el esparcimiento a través de claras que ha demostrado ser efectivo para reducir las pérdidas de agua por transpiración y especialmente para mejorar el estado hídrico de las plantas (Rodríguez-Soalleiro et al. 2009) y aumentar su crecimiento individual (Hosseini 2017).

Prevenir que los bosques se conviertan en víctimas del calentamiento global es una prioridad para mantener un sumidero importante de carbono. El cuarto informe de Evaluación del IPCC destaca a los ecosistemas forestales como el principal almacén de carbono terrestre, que contiene 1640 Gt C, por lo que desempeñan un papel decisivo en el equilibrio mundial del carbono y poseen un potencial importante de mitigación del cambio climático (IPCC 2007b, Fischlin et al. 2007, FAO 2010).

La teledetección, constituye una fuente de información valiosa para el seguimiento de procesos ambientales de gran impacto para nuestro planeta, como sería el cambio climático y además en el cartografiado y monitoreo de actividades forestales (Franklin 2001, Chuvieco 2008). Todos los elementos de la naturaleza cuentan con una respuesta espectral propia, el cual es captado por los sensores remotos. Así se puede estudiar las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y poner de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales terrestres (Pérez 2011). En los últimos años se han desarrollado numerosos trabajos orientados a la detección de procesos de decaimiento en los bosques basados en el análisis del estado fisiológico de los árboles y la cartografía del contenido de los principales pigmentos que regulan la eficiencia de la fotosíntesis (García-Ferrer 2013).

Dentro de este contexto, se desarrolló el proyecto LIFE11 ENV/ES/535 – Operation CO₂ el cual tuvo como objetivo general demostrar la viabilidad económica de proyectos



agroforestales de secuestro de carbono en Europa mediante la conservación y manejo de bosques y las prácticas agroforestales integradas. Dicho objetivo se desarrolló en tres diferentes zonas de España, entre las cuales se encuentra un bosque bajo manejo en Lleida, Cataluña, donde se han implementado medidas silvícolas de adaptación al cambio climático a fin incrementar la fijación de carbono y que será la zona estudiada en el presente trabajo.

Teniendo en cuenta lo anteriormente descrito, la presente investigación tiene como objetivo general evaluar la eficacia de las medidas silvícolas aplicadas en la masa forestal de Obaga de Coll de Déu en la Muntanya d'Alinyà para aumentar su vigor a través de herramientas de teledetección.

Se definieron como objetivos específicos: analizar las posibilidades del nuevo satélite Sentinel-2 en el campo agroforestal, determinar la funcionalidad de los 10 metros de resolución espectral que provee el Sentinel-2 para este estudio y similares así como evaluar series temporales de imágenes de teledetección.

2. Antecedentes

Campelo de Santana (2014) realizó una investigación en la misma zona de estudio como parte de los estudios previos a la implementación de las medidas silvícolas de adaptación. La investigación consistió en un análisis temporal del vigor de la vegetación, similar al realizado en el presente estudio, a través de índices de vegetación a partir de imágenes Landsat 5 ETM, en el periodo 1984-2011. Y donde ha observado que el vigor de la masa forestal en estudio experimentó una disminución del vigor en el transcurso de los años.

Tras investigaciones realizadas, se ha decidido implementar las medidas silvícolas, para obtener mayores niveles de fijación de carbono, siguiendo el modelo de claros ORGEST Ps_05, modelo de gestión desarrollado a través del proyecto LIFE12ENV / ES / 00073 Demorgest, liderado por el Centro de la Propietat Forestal de Catalunya (CREAF), el cual consistió en la selección gradual de los árboles existentes en 3 categorías para recrear los procesos naturales de perturbación y regeneración típicos de los bosques de *Pinus sylvestris* en la región (Anónimo 2016).

Intentar aplicar el modelo de forma muy rigurosa resultó imposible dadas las características de la masa pre-existente por lo cual se planteó una primera corta de adaptación donde las densidades finales son superiores a las del modelo así como los diámetros de cada clase son ligeramente inferiores. La siguiente corta prevista (a los 10 años) será necesario que termine de adaptar la masa a lo que propone el modelo (Farrion et al. s.f.).

En las medidas silvícolas ejecutadas se buscó obtener pequeñas parcelas uniformes en diferentes etapas de maduración: áreas de regeneración (densidad arbórea alrededor de 300), áreas con árboles pequeños (10 a 15 cm de diámetro, 46% de área bisimétrica), árboles medianos (20-30 cm de diámetro, 46% de área bisimétrica) y árboles más grandes (> 35cm de diámetro, 8% del área bisimétrica) (Anónimo 2016).

Por lo tanto, tras la ejecución de las medidas silvícolas en el área, considerando los árboles preexistentes, resultó en la distribución en el terreno que se muestra en la Figura 1 (área de árboles pequeños en celeste, de tamaño medio en verde y arboles grandes en rojo).

Así la superficie final para cada grupo fue de la siguiente manera: árboles pequeños 2,22 ha, árboles medianos 11,26 ha y árboles grandes 4,99 ha, totalizando 18,47 ha de bosque (Anónimo 2016).

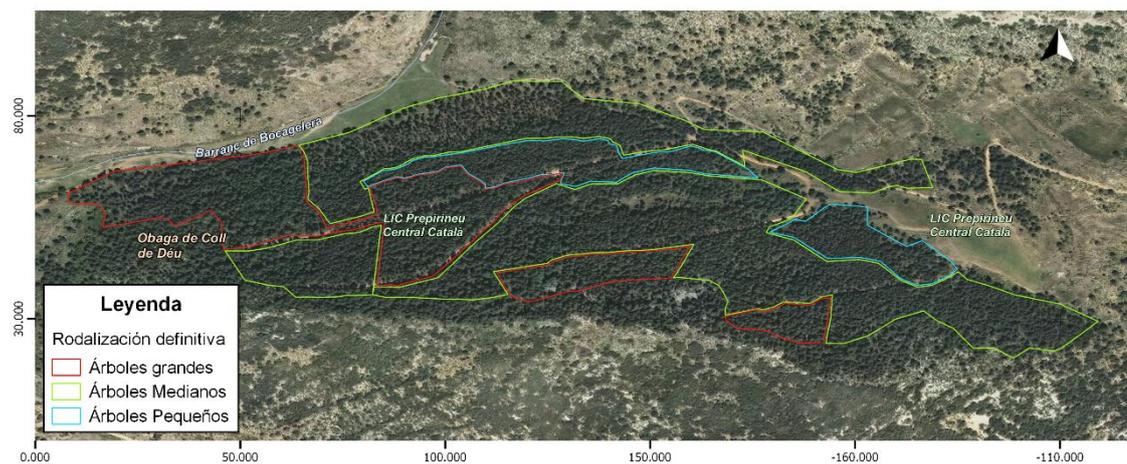


Figura 1. Medidas silvícolas implementadas en el proyecto Operation CO₂

Estas operaciones tuvieron una duración de 4 meses, empezando los últimos días de julio de 2015 y finalizando durante la última semana de noviembre de 2015.

3. Material y métodos

3.1. Caracterización del área de estudio

El presente estudio se localiza en la zona forestal de Obaga de Coll de Déu ubicada dentro del Espacio Natural de la Montaña de Alinyà (**Error! Reference source not found.**) localizada en el municipio de Figols i Alinyà (Lérida), en la comarca catalana del Alt Urgell. Este espacio natural es propiedad de la Fundación Catalunya - La Pedrera (FCLP).

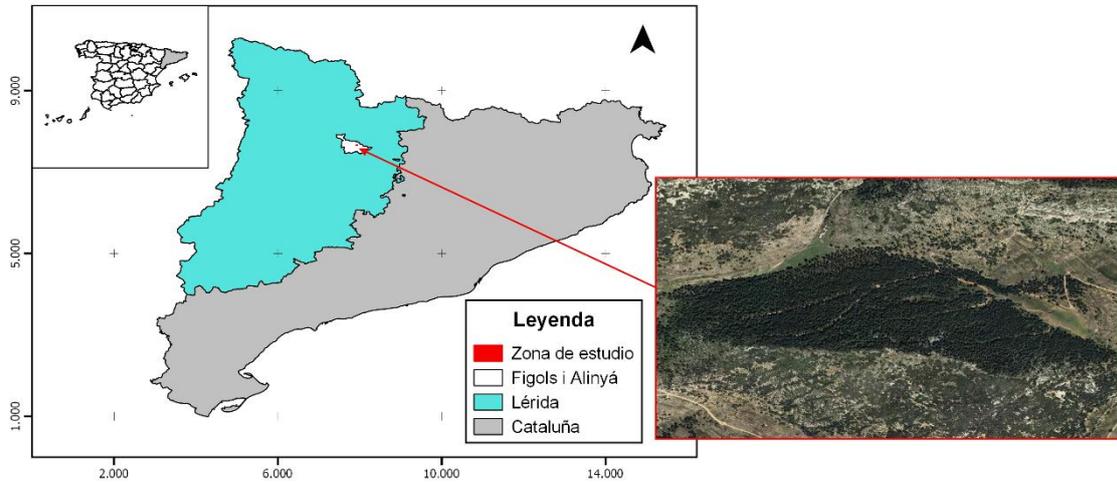


Figura 2 Ubicación de la zona de estudio.

La zona del espacio natural cuenta con una altitud entre 500 y 2.380 m de altura y un relieve accidentado (Figura 3). Tal geografía proporciona una gran diversidad de paisajes y ambientes, tales como bosques, pastos, matorral, altas cumbres y accidentadas zonas de peñascos con una gran riqueza faunística y botánica (Sánchez et al. 2016).

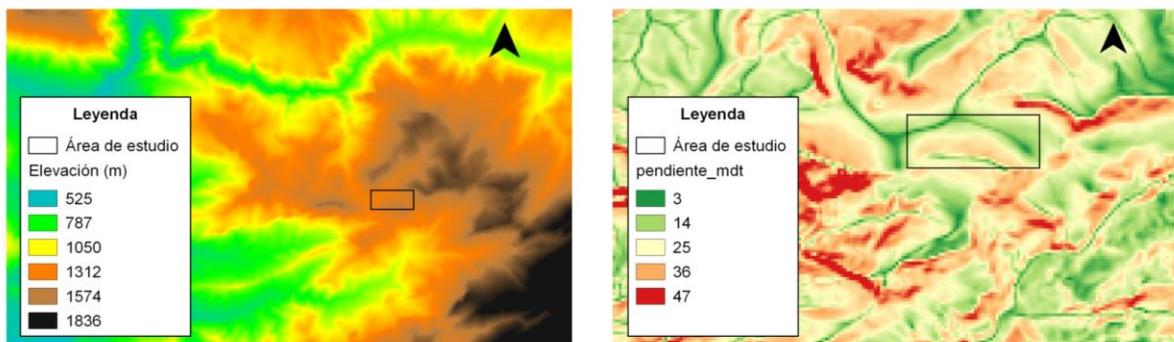


Figura 3. Modelo digital del terreno (izquierda) y pendiente (derecha) de la zona de estudio.

En cuanto a las características climáticas, las temperaturas medias oscilan entre los 8°C y los 16 °C, con fenómenos de inversión térmica en el fondo del valle en los meses fríos. Por lo que se incluye a la zona en la región eurosiberiana, pero también se encuentran zonas que son típicamente mediterráneas (Moisés et al., 2004). La pluviometría media oscila entre los 650mm y los 1100mm, donde los valores máximos se dan en la primavera y el verano, y los valores mínimos durante el invierno (Sánchez et al. 2016).



La vegetación de los estratos bajos y medios del valle de Alinyà se encuentra representado por encinares y pinares mediterráneos, como el pino silvestre (*Pinus sylvestris*), el pino salgareño o negral (*Pinus nigra*), la encina (*Quercus ilex*) y el roble pubescente (*Quercus humilis*), con predominancia del boj común (*Buxus sempervirens*) al estrato bajo. Entre las especies de ribera, los más representativos son los álamos (*Populus alba*), chopos *Populus nigra*) y alisos (*Alnus glutinosa*). El bioma subalpino se extiende en la parte más elevada del valle, en el que predomina el sustrato herbáceo, como los prados de festuca (*Festuca sp.*), y los matorrales o árboles, como el enebro (*Juniperus communis*) y los pinos negros (*Pinus uncinata*), de dimensiones reducidas, adaptadas a la falta de nutrientes en el suelo, nevadas y fuertes vientos. (Moisés et al. 2004).

El área bajo estudio corresponde a la zona donde se ha implementado medidas silvícolas como parte del proyecto Life+ Operación CO₂, que se detallaba en el apartado anterior. Este área cuenta con una superficie de 18, 47 ha de bosque de *Pinus sylvestris*, con presencia de *Buxus sempervirens* y espino (*Crataegus monogyna*), surgida por regeneración tras el abandono de las labores agrícolas durante el siglo XX (Sánchez et al., 2016).

3.2. Programas informáticos utilizados para el estudio

En la siguiente tabla se presenta la lista de programas utilizados para el procesamiento de las imágenes satelitales así como para la obtención de estadísticos y la confección de los mapas. Se ha tratado de emplear en la medida de lo posible, software open source, si bien algunas operaciones ha sido necesario realizarlas mediante software propietario.

Tabla 1. Programas informáticos utilizados para el procesamiento de imágenes satelitales.

Software	Versión
QGIS	2.14.11 – Essen
ArcGIS	10.3
Sentinel Application Platform (SNAP)	5.0.5
Sentinel to Correction (Sen2Cor) - SNAP plug-in	2.1.2

3.3. Satélites seleccionados

Para la realización del presente estudio se ha optado por utilizar imágenes proporcionadas por los satélites Sentinel-2 y Landsat 7 y 8, teniendo en cuenta sus características y campos de aplicación. Estos satélites han sido desarrollados para



proporcionar datos en el área de la selvicultura, agricultura y gestión de recursos naturales, entre otras aplicaciones. Además, ambos presentan la ventaja de que sus imágenes son de libre distribución y uso gratuito.

La misión Sentinel-2 cuenta con el funcionamiento en simultaneo de dos satélites idénticos en una sola órbita (Sentinel 2A desde junio de 2015 y 2B desde marzo del 2017), cada uno de cuales cuenta con un sensor multiespectral (MSI - Multi-Spectral Instrument) que cubre un rango espectral desde el visible hasta el infrarrojo de onda corta y que entrega imágenes de alta resolución (10 metros en espectro visible e infrarrojo cercano) con una alta frecuencia a escala global (ESA 2016).

El Landsat 7, que se encuentra en funcionamiento desde abril de 1991, cuenta con un sensor, el Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +) que proporciona imágenes en ocho bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas del espectro visible e infrarrojo (bandas 1 al 7) y de 15 metros para la banda pancromática. (NASA s.f.).

El Landsat 8, lanzado el 11 de febrero de 2013, cuenta con dos sensores: el óptico OLI (Operational Land Imager) y el térmico TIRS (Thermal Infrared Sensor) y proporcionan imágenes en nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas del espectro visible, infrarrojo y detección de cirrus (bandas 1 al 7 y 9), de 15 metros para la banda pancromática (banda 8) y de 100 metros para las bandas térmicas (bandas 10 y 11). (USGS 2016).

3.4. Imágenes satelitales utilizadas

Las imágenes empleadas para el análisis del área de interés se presentan en la siguiente tabla.

Tabla 2. Imágenes satelitales utilizadas en el estudio.

Nº	Sensor (escena)	Fecha de toma	% de nubes
1	Landsat 7 ETM+ (path 198/ row 031)	28/07/2010	2.00
2	Landsat 8 OLI (path 198/ row 031)	31/07/2014	2.18
3	Sentinel 2A MSI (31TCG)	06/07/2015	5,09
4	Sentinel 2A MSI (31TCG)	7/07/2016	2,07
5	Sentinel 2A MSI (31TCG)	12/06/2017	0.37

Las imágenes Sentinel-2 fueron descargadas del *Sentinels Scientific Data Hub* (<https://scihub.copernicus.eu/>) a nivel L1C. Las imágenes de alto nivel Landsat 7 y Landsat 8

(atmosféricamente corregidas) se descargaron desde la interfaz de pedido ESPA disponible en la página web del *United States Geological Survey* (USGS) (<https://espa.cr.usgs.gov/login?next=https%3A%2F%2Fespa.cr.usgs.gov%2F>).

Las imágenes Sentinel-2 y Landsat cuentan con una determinada distribución de escenas. Se ha utilizado las escenas 31TCG para Sentinel-2 y las escenas 198031 para Landsat 7 y 8 debido a que las mismas cubren el territorio bajo estudio.

Como puede observarse, la mayoría de las imágenes utilizadas fueron tomadas en verano (julio). Se han seleccionado tales debido a que, según revisiones bibliográficas (Olsson 1994, Gamón et al. 2016, Campelo de Santana 2014), las coníferas presentan una mayor actividad vegetativa en dicha época, como puede observarse en la Figura 4, los picos en los patrones estacionales de la fotosíntesis (expresados en GPP, líneas negras), corresponden a comienzos y mediados de julio aproximadamente.

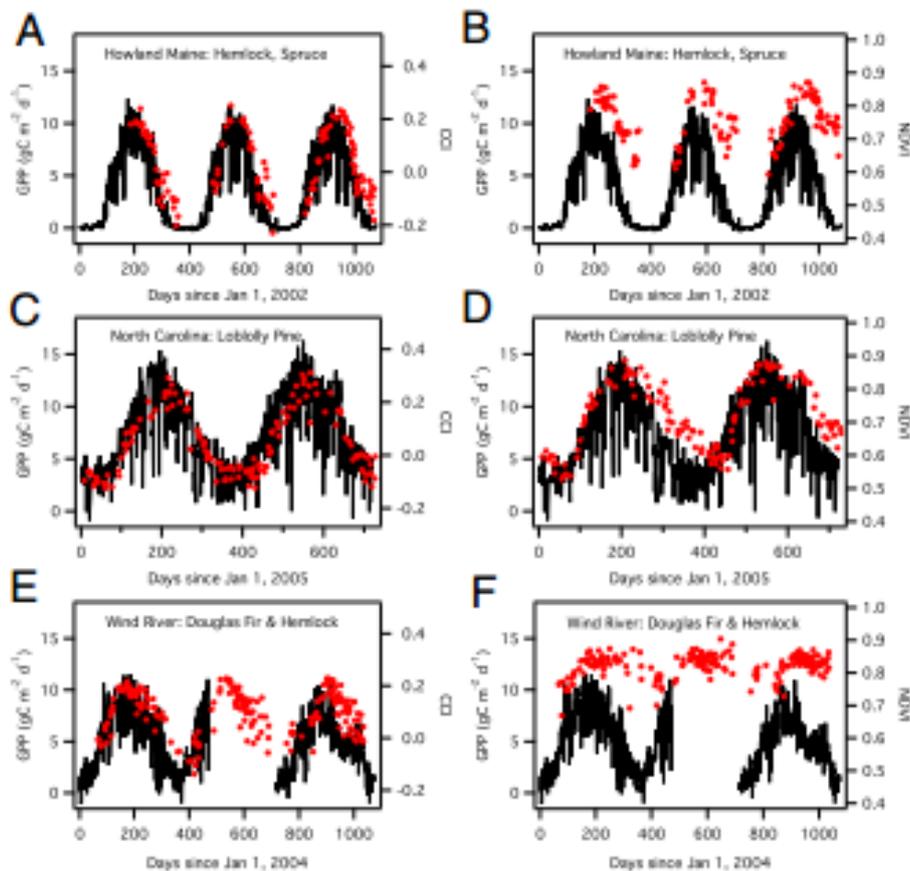


Figura 4. Patrones estacionales de la fotosíntesis de coníferas. Fuente: Gamon et al. 2016

Se ha verificado la calidad de las imágenes Landsat 8 y 7 a través de las bandas de Evaluación de Calidad (QA) de los píxeles de las imágenes de nivel 2. Estas bandas indican



cuales píxeles presentan condiciones adversas de instrumento, atmosféricas o superficiales. Se observó que los píxeles de la zona de estudio tienen un valor de 322, es decir que corresponde a terreno claro libre de nubes, asegurando así la calidad en la reflectancia de las mismas. Así también, cuenta con la misma característica la imagen Landsat 7 con píxeles con valor 66 en el área de interés.

La calidad de las imágenes Sentinel-2 fue revisada a través de la banda *scene_classification* disponible en los productos nivel 2A, una vez realizada la oportuna transformación desde el nivel L1C. Además se utilizó, la máscara de nubes disponible en los metadatos de cada una de las imágenes donde se pudo verificar la no presencia de nubes en la zona de estudio.

3.5. Preprocesamiento de imágenes satelitales

Los productos L1C Sentinel-2 corresponden a datos radiométrica y geoméricamente corregidos, productos con reflectancia por encima de la atmosfera. Las correcciones incluyen la ortorrectificación y el registro espacial en un sistema de referencia global (ortoimágenes en proyección UTM / WGS84) con precisión de subpíxeles. Las imágenes L1C se entregan en *tiles* de 100 km².

Estas imágenes se procesaron a datos de nivel 2A usando el Sentinel-2 Toolbox (SNAP) el cual es un software de código abierto que permite manipular, analizar, exportar/importar toda información generada por la misión Sentinel-2. El procedimiento de corrección atmosférica se ejecutó con la instalación del complemento Sen2Cor, obteniendo así imágenes de reflectancia de superficie o nivel L2A. La corrección topográfica de las imágenes Sentinel-2 se realizó a través del mismo complemento anteriormente mencionado, Sen2Cor, que además de la corrección atmosférica puede ejecutar simultáneamente la corrección del terreno usando un Modelo Digital de Elevación, así como la remoción de cirros, todo en un solo paso conformando adecuadamente el archivo de configuración del programa. En este caso, para la corrección topográfica, se emplea el Modelo Digital de Elevación SRTM de CGIAR-CSI (90m), producido originalmente por la NASA y disponible para todo el mundo.

En cuanto a las imágenes Landsat 7 y 8, como ya se mencionó anteriormente, se han obtenido las imágenes ya en valores de reflectancia de superficie, por cortesía de la *United States Geological Survey* (USGS) mediante el servicio de descarga de alto nivel. El uso de imágenes de reflectancia de superficie es importante para poder realizar una comparación temporal válida entre los distintos sensores utilizados. Se ha observado que entre el Landsat 7 y 8 existe una mayor diferencia entre escenas cuando se utiliza imágenes por encima de la



atmósfera que cuando se utiliza las imágenes de reflectancia de superficie. En el caso de la reflectancia por encima de la atmosfera, la diferencia media puede ser de hasta el 6% de la reflectancia, mientras que la reflectancia de superficie puede verse afectada hasta solo un 2% (Flood 2014).

Seguidamente se procedió a la corrección topográfica de todas las imágenes satelitales Landsat utilizadas. Este proceso no siempre es necesario pero resulta importante en zonas montañosas, como es el caso de nuestra zona de estudio (Young et al. 2017). Esto se debe a que los algoritmos de corrección topográfica buscan compensar las diferencias en la radiancia que detecta un sensor remoto como consecuencia de la distinta pendiente y orientación de las laderas en las que se ubican las distintas cubiertas (Sabater et al. 2016). Así, la corrección topográfica se realizó por medio de la utilización del complemento SAGA (2.12) dentro del software QGIS.

Para poder computar el gradiente y aspecto de la inclinación, es necesario utilizar un Modelo Digital de Elevación (MDE) de una resolución similar a la imagen Landsat (Hantson y Chuiwieco 2011). Por lo cual se ha optado por utilizar el Modelo Digital del Terreno (MDT25) (Figura 3 izquierda) proporcionado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) con paso de malla de 25 m obtenido por interpolación de modelos digitales del terreno de 5 m de paso de malla procedente de la interpolación a partir de la clase terreno de vuelos LIDAR del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA). EL MDT se encuentra disponible en formato .asc y en ETRS89 / UTM zona 31, por lo que para poder utilizarlo se procedió a transformarlo a formato .tif.

A fin de poder realizar la corrección topográfica con SAGA, previamente fue necesario recortar las imágenes Landsat a las dimensiones de MDT y realizar un *Resampling* del MDT para ajustar al tamaño y posición de los píxeles de las imágenes Landsat (30 m).

La remoción de los sombras por efecto de la topografía puede ser removido por diferentes algoritmos. El algoritmo de corrección topográfica seleccionado fue el *C-Correction* debido a que fue considerado como uno de los algoritmos con mejores resultados según Hantson y Chuiwieco (2011) y Sabater et al. (2016). Este método fue desarrollado por Teillet et al. (1982):

$$\rho_{\lambda,h,i} = \rho_{\lambda,i} \left(\frac{\cos \theta_s + c_\lambda}{\cos \gamma_i + c_\lambda} \right) \quad (1)$$

$$c_\lambda = \left(\frac{b_\lambda}{m_\lambda} \right) \quad (2)$$



Donde b_λ y m_λ son los coeficientes de regresión entre la iluminación y las diferentes reflectancias de banda.

3.6. Extracción de datos de Índices de Vegetación

A fin de cumplir con el objetivo del presente trabajo y poder evaluar la existencia de algún cambio en el vigor del bosque tras el preprocesamiento de las imágenes satelitales, se procedió a la utilización de índices de vegetación. Sobrino et al. (2000, p. 105) definen el índice de vegetación como “un parámetro calculado a partir de los valores de reflectividad a distintas longitudes de onda y que pretende extraer la información relacionada con la vegetación minimizando la influencia de otros factores externos como las propiedades ópticas del suelo, la irradiancia solar, etc.

Los índices fueron diseñados para su uso a partir de datos de reflectancia y la mayoría de ellos definidos hasta el momento tienen en común el uso de los valores de reflectancia en las zonas espectrales del rojo (R) e infrarrojo cercano (NIR) debido al comportamiento espectral que presenta la vegetación verde y el suelo en dichas zonas espectrales: la reflectividad de la vegetación pasa de un mínimo relativo en el rojo, correspondiente a la banda de absorción de la clorofila, a un máximo absoluto en el infrarrojo cercano que es consecuencia de las dispersiones múltiples de la radiación por el interior de la estructura celular (controlada por el *leaf area index* LAI, o índice de superficie foliar y la densidad de vegetación verde) (Gilabert et al. 1997).

Para la mencionada evaluación se seleccionaron los índices NDVI y SAVI, a ser definidos a continuación.

El *Normalized Difference Vegetation Index* o Índice de vegetación de diferencias normalizadas (NDVI), ha sido el más usado en teledetección de vegetación durante las dos últimas décadas y fue propuesto originalmente por Rouse et al. (1974) (Ecuación 3) como el cociente entre la diferencia de reflectancia entre la banda del infrarrojo próximo y la banda del rojo, y la suma de estas mismas bandas.

$$NDVI_i = \frac{\rho_{i,NIR} - \rho_{i,R}}{\rho_{i,NIR} + \rho_{i,R}} \quad (3)$$

Este índice se obtiene a partir de la reflectividad de las bandas 4 y 5 para el Landsat 8 (ecuación 4), las bandas 3 y 4 para el Landsat 7 (ecuación 5) y las bandas 8 y 4 para el Sentinel-2 (ecuación 6).



$$NDVI_{L8} = \frac{\text{banda } 5 - \text{banda } 4}{\text{banda } 5 + \text{banda } 4} \quad (4)$$

$$NDVI_{L7} = \frac{\text{banda } 4 - \text{banda } 3}{\text{banda } 4 + \text{banda } 3} \quad (5)$$

$$NDVI_{S2} = \frac{\text{banda } 8 - \text{banda } 4}{\text{banda } 8 + \text{banda } 4} \quad (6)$$

El NDVI es un indicador del verdor de la biomasa y toma valores en el rango de -1 a 1, donde valores negativos indican superficies sin vegetación, tal como agua, nieve o nubes y valores positivos crecientes indican vegetación vigorosa, el suelo presenta valores bajos, mientras que la vegetación se encuentra en el rango de 0,2 a 0,8. Los valores bajos y positivos representan arbustos y pastizales (aproximadamente 0,2 a 0,4), mientras que los valores altos indican bosques lluviosos templados y tropicales (valores cercanos a 1) (Sobrino et al. 2000, Sentinel hub s.f. a, Copernicus s.f.).

El *Soil Adjusted Vegetation Index* o Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI), propuesto por Huete y colaboradores, busca minimizar el efecto de la reflectancia del suelo mediante la introducción del factor L en la fórmula del NDVI. El factor L es constante para ajustar la línea vegetación-suelo al origen y sus autores proponen un posible valor en torno a 0,5. Este índice coloca los valores entre -1,0 y 1,0. (Huete 1988).

$$SAVI_{i,j} = \frac{(\rho_{i,j,NIR} - \rho_{i,j,R}) \times (1+L)}{(\rho_{i,j,NIR} + \rho_{i,j,R} + L)} \quad (7)$$

$$SAVI_{L8} = \frac{(\text{banda } 5 - \text{banda } 4) \times (1+0,5)}{(\text{banda } 5 + \text{banda } 4 + 0,5)} \quad (8)$$

$$SAVI_{L7} = \frac{(\text{banda } 4 - \text{banda } 3) \times (1+0,5)}{(\text{banda } 4 + \text{banda } 3 + 0,5)} \quad (9)$$

$$SAVI_{S2} = \frac{(\text{banda } 8 - \text{banda } 4) \times (1+0,5)}{(\text{banda } 8 + \text{banda } 4 + 0,5)} \quad (10)$$

La determinación de los índices NDVI y SAVI en las imágenes Landsat se realizó a través del software QGIS con la calculadora raster utilizando las ecuaciones 5, 6 y 8. Para la determinación de los índices de vegetación en las imágenes Sentinel-2 se utilizó el programa SNAP utilizando las ecuaciones 8, 9 y 10. El valor de L utilizado en el índice SAVI fue de 0,5.



Tras la obtención de los índices de vegetación, se ha optado por re-clasificar las imágenes en categorías de vigor, a fin que los resultados de los diferentes años sean fáciles de comparar visualmente. Para los valores NDVI se han establecido cinco categorías, donde los píxeles con valor $< 0,5$ corresponden a vigor vegetativo muy bajo, de $0,5$ a $0,6$ vigor vegetativo bajo, de $0,6$ a $0,7$ vigor vegetativo medio, de $0,7$ a $0,8$ vigor vegetativo alto y $> 0,8$ valor vegetativo muy alto.

Para los valores SAVI también se asignaron cinco categorías, donde los píxeles con valor $< 0,3$ corresponden a vigor vegetativo muy bajo, de $0,3$ a $0,35$ vigor vegetativo bajo, de $0,4$ a $0,45$ vigor vegetativo medio, de $0,45$ a $0,5$ vigor vegetativo alto y $> 0,5$ valor vegetativo muy alto. Exceptuando para el año 2015, donde solo se asignaron cuatro categorías, puesto que así se representaba mejor el rango de píxeles.

3.7. Mapeamiento y Layout

Los mapas e imágenes generados para el presente estudio fueron elaborados por medio del software QGIS desarrollado por la Fundación OSGeo (Open Source Geospatial Foundation) de licencia gratuita y código abierto.

4. Resultados y discusión

4.1. 28 de julio de 2010

Se obtuvieron como resultado los mapas de vigor de la masa boscosa para el año 2010, a partir de los valores NDVI y SAVI obtenidos (ver Anexo). A partir de los datos NDVI, se puede verificar la mayor parte de la masa boscosa con vigor alto, y algunas pocas zonas con vigor muy alto, sin embargo los resultados SAVI indican un mayor número de zonas con un vigor muy alto. La zona periférica del norte presenta vegetación con vigor medio, tanto para valores NDVI como SAVI.

En el año 2010, el valor mínimo NDVI y SAVI fue de $0,46$ y $0,31$ respectivamente, y los valores máximos de $0,84$ y $0,49$. La media NDVI fue de $0,75$ y los valores SAVI una media de $0,44$.



4.2. 31 de julio de 2014

En el año 2014, la masa boscosa presentaba una vegetación con vigor muy bueno en casi toda su totalidad, tanto para los valores NDVI como SAVI, que arrojaron valores máximos de 0,86 y 0, 51; y una media de 0,8 y 0,45, respectivamente. La zona periférica del norte continua presentando una vegetación con poco vigor (ver Anexo).

4.3. 6 de julio de 2015

A través del mapa de vigor vegetativo generado a partir de valores NDVI (ver Anexo) se puede percibir una masa boscosa con una vegetación predominantemente vigorosa (alta), exceptuando por las zonas periféricas del norte y alguna zona central que presenta una vegetación con vigor medio. En cuanto al mapa obtenido a partir de valores SAVI (ver Anexo) se puede observar el mismo comportamiento, exceptuando por la zona central de la masa y periférica sur, que presenta una vegetación muy vigorosa. La media de los valores NDVI y SAVI es de 0,70 y 0,39, respectivamente.

4.4. 7 de julio de 2016

En el mapa de vigor vegetativo generado se puede verificar claramente las medidas silvícolas ejecutadas entre finales de julio y noviembre de 2015, a través de los píxeles que exhiben una actividad vegetativa muy baja en la zona central. En el mapa obtenido a partir de valores NDVI (ver Anexo), se puede observar que todos los árboles grandes presentan una vegetación con vigor medio y bajo, los árboles medianos y pequeños presentan también una predominancia de vigor media a bajo, sin embargo se verifican zonas marcadas de vegetación con vigor alto. La media de los valores NDVI es de 0,60.

En el caso del mapa a partir de valores SAVI (ver Anexo), se observa también que gran parte de los árboles grandes tienen un vigor medio a bajo, pero se perciben unas pequeñas zonas con vigor alto. En cuanto a los árboles medianos ubicados hacia el norte de la masa boscosa, estos presentan también mayoritariamente un vigor medio

4.5. 12 de junio de 2017

Para junio de 2017, considerando el mapa a partir de valores NDVI (ver Anexo), se puede verificar que los árboles grandes presentan una vigorosidad predominante media a baja



exceptuando por algunos que se encuentran en la zona periférica sur que presentan vigor alto. En cuanto a los árboles medianos, estos presentan vigorosidad media a baja en algunas zonas, pero también existe una superficie importante con vigorosidad alta. Los árboles pequeños presentan vigorosidad media a baja, y alguna zona con vigor alto.

Teniendo en cuenta el mapa a partir de valores SAVI (ver Anexo), los árboles grandes se comportan de manera similar a lo mencionado antes, los medianos también, exceptuando por la presencia de una zona pequeña con vigor muy alto en la zona central de la masa boscosa. Los árboles pequeños presentan principalmente un vigor medio a bajo. La media de los valores NDVI y SAVI son de 0,65 y 0,37, respectivamente.

4.6. Evolución de la zona de estudio entre los años 2010 a 2017

La evolución de los valores NDVI y SAVI en la zona de estudio se puede valorar claramente en la Figura 5 y Figura 6. Entre los años 2010 y 2014 se puede ver un aumento del vigor vegetativo en gran parte del área de estudio. Si bien los sensores que captaron las imágenes para ambos años fueron diferentes (Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI), Ke et al. (2015) han concluido que tras la aplicación de los mismos métodos de corrección atmosférica para derivar la reflectancia superficial, los NDVI obtenidos de imágenes Landsat 8 OLI y Landsat 7 ETM+ presentan una buena concordancia global, por lo tanto pueden ser comparados.

Entre el año 2014 y 2015 se percibe que el vigor de la masa boscosa decae. Hay que considerar que en el presente estudio, a partir del 2015, el sensor utilizado es el Sentinel-2A MSI con una resolución de 10m. Korhonen et al. (2017) mencionan que comparando una imágenes de reflectancia de superficie S2 y L8, las reflectancias NIR coinciden muy bien, sin embargo en las longitudes de onda visibles, las reflectancias del S2 son inferiores a las reflectancia del L8, por lo tanto, tal diferencia podría influir en los valores de los índices de vegetación determinados en el presente trabajo.

Entre el año 2015 y 2016 se puede verificar una disminución del vigor de la masa boscosa. Sin embargo, para el año 2017, se distingue un mayor número de píxeles con vigor vegetativo alto.

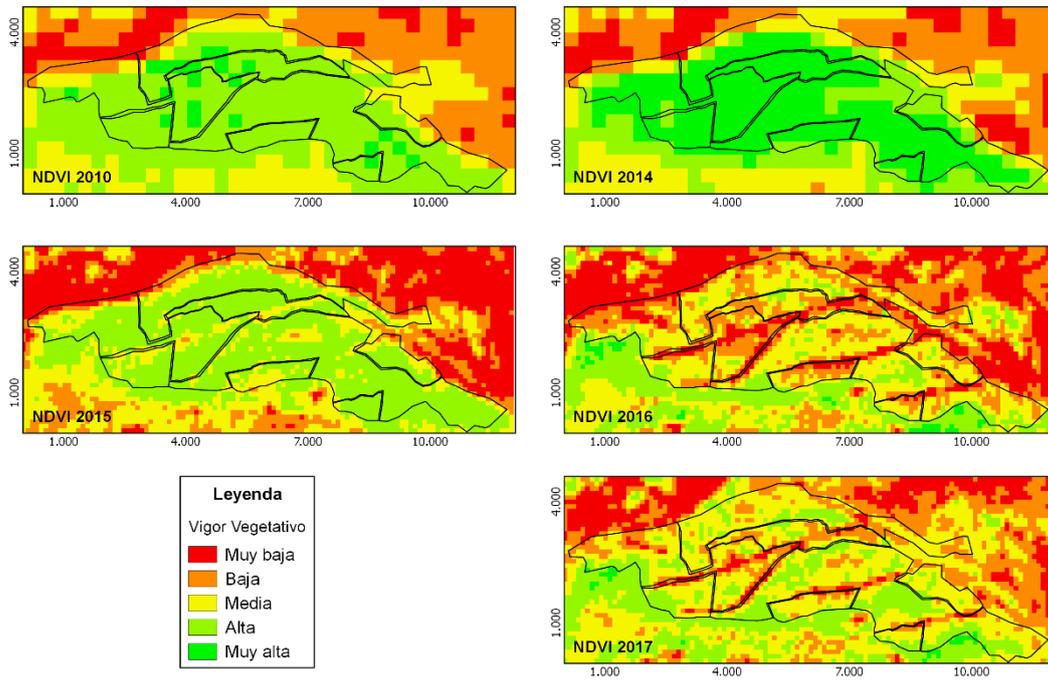


Figura 5. Evolución de los valores NDVI en la zona de estudio

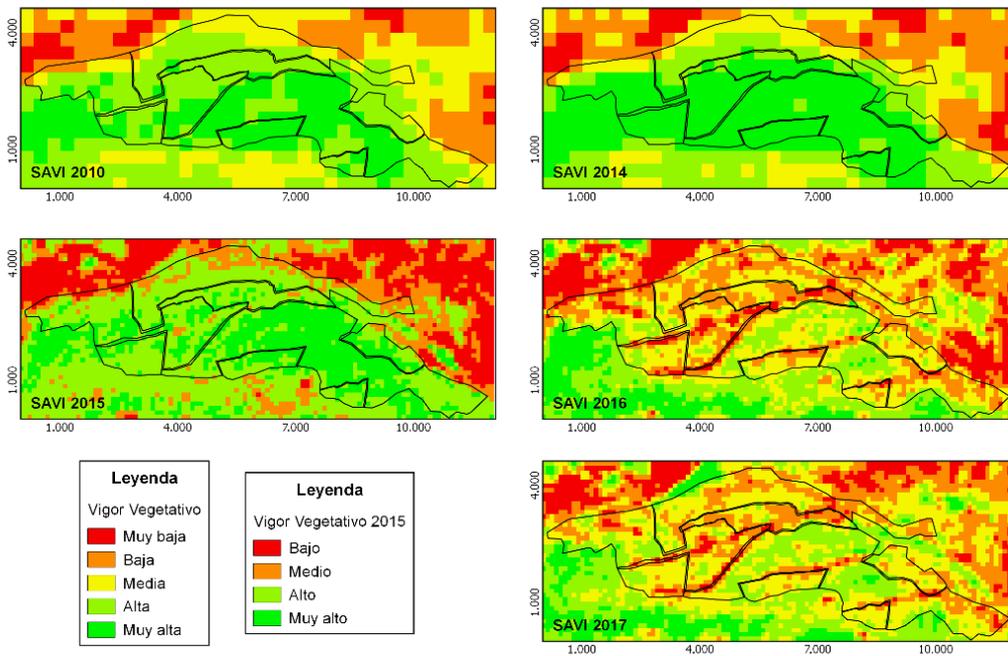


Figura 6. Evolución de los valores SAVI en la zona de estudio.



Como vimos anteriormente, ambos índices muestran un comportamiento similar en la vegetación, que se aprecia aún más en la Figura 7 donde se puede ver los valores medios para cada año de estudio.

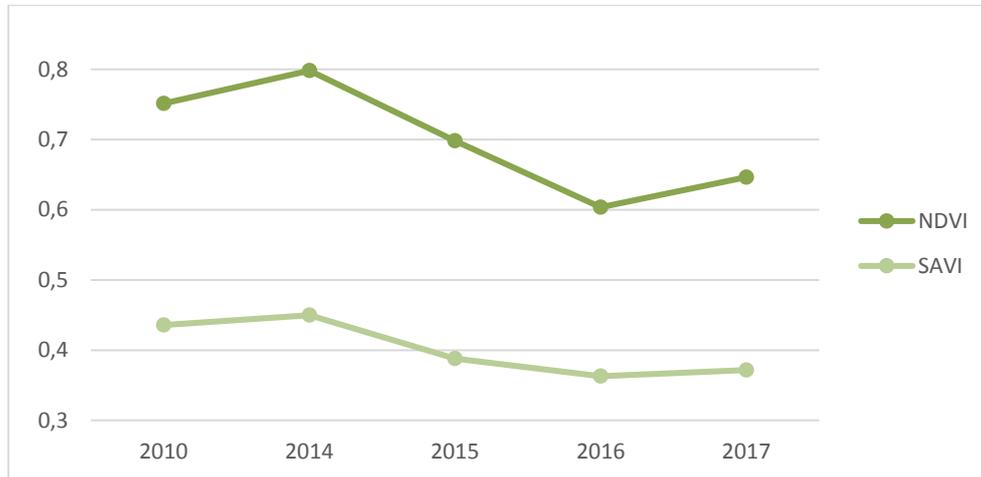


Figura 7 Evolución de la media del NDVI y SAVI en la zona de estudio para el periodo 2010-2017

Ambos índices, indican una evolución similar en la masa forestal, sin embargo, los valores SAVI son menores a los arrojados por el índice NDVI. Esta situación similar se ha dado en la investigación realizada por CAO et al. (2014), quienes han concluido que los valores SAVI son mayores que los valores NDVI, en zonas con cobertura vegetal baja, mientras que en zonas con una densa vegetación, como es el caso del presente estudio, el comportamiento se da de forma contraria.

Entre los años 2015 a 2016, los valores medios de NDVI y SAVI se redujeron de 0,7 a 0,6 y de 0,39 a 0,36, respectivamente. Esta disminución de vigor se debió a las medidas silvícolas ejecutadas. Sin embargo, los valores medios NDVI y SAVI han aumentado a 0,65 y 0,37 en el año 2017, por lo que ya se podría verificar un efecto positivo en el vigor de la vegetación.

4.7. Evolución de la vegetación por categorías

Analizando los valores NDVI y SAVI a nivel de categorías de árboles se obtuvieron los siguientes resultados representados en la Figura 8 y Figura 9.

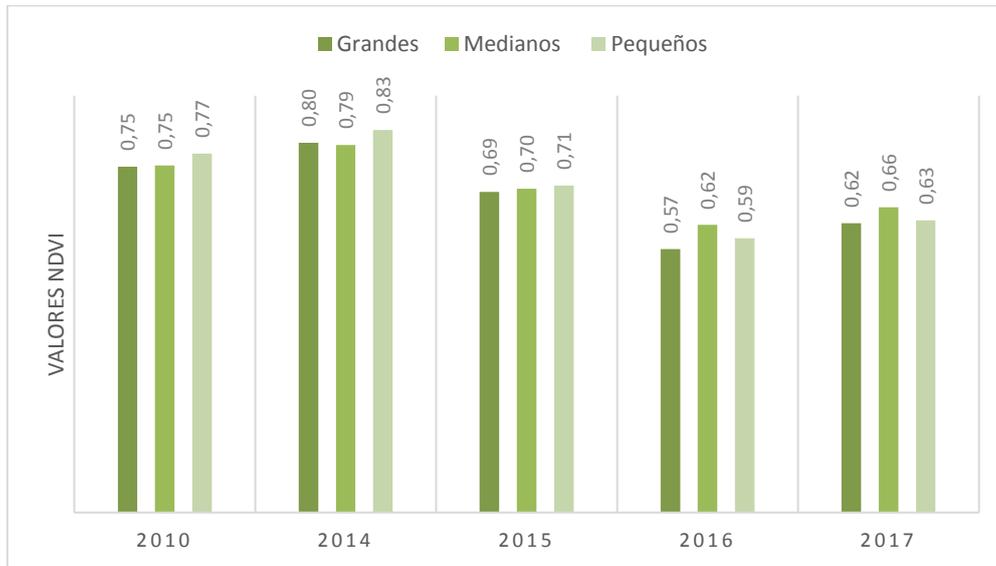


Figura 8. Evolución de la media del NDVI según categoría de árboles.

Se puede verificar que si bien ha existido una disminución del vigor vegetativo tras las acciones implementadas, esa reducción no se dio de igual manera en las tres categorías, pudiéndose apreciar que los árboles medianos si bien disminuyeron en vigor, se mantuvieron más vigorosos que los grandes y pequeños, teniendo en cuenta tanto los valores NDVI como los calores SAVI.

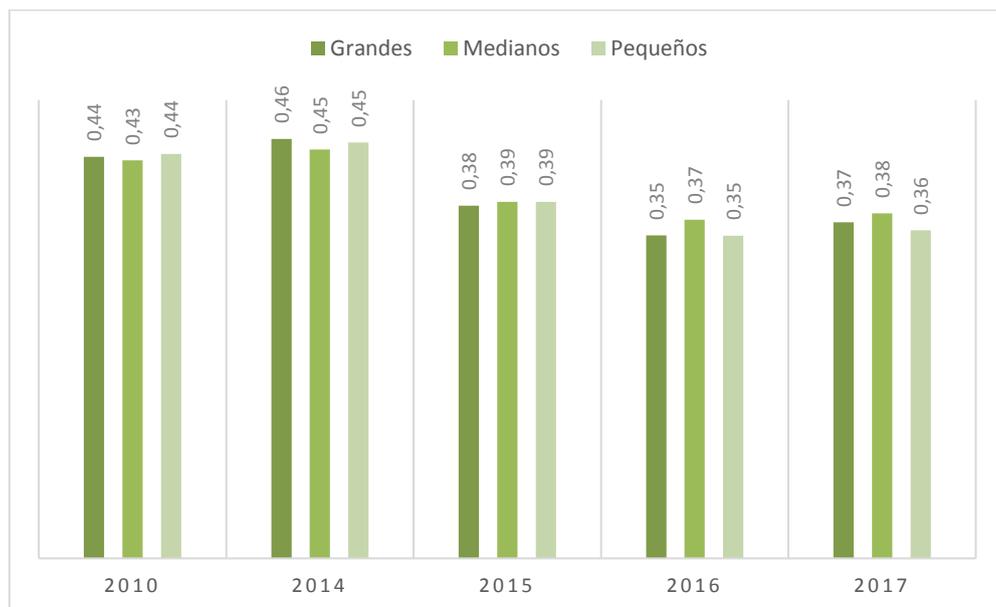


Figura 9. Evolución de la media del SAVI según categoría de árboles.



En el año 2017, el mejoramiento en el vigor se da en las tres categorías, sin embargo, se percibe una mejor respuesta en los árboles grandes y pequeños (teniendo en cuenta valores NDVI) o sólo los árboles grandes (considerando valores SAVI).

5. Conclusiones

A través del presente estudio se ha buscado evaluar la eficacia de las medidas silvícolas para aumentar el vigor de la masa forestal de Obaga de Coll de Déu mediante técnicas de teledetección, y se concluye que es posible inferir alguna mejoría en la masa, sin embargo para cumplir satisfactoriamente el presente objetivo es necesario ampliar la escala temporal a 7 o 10 años posteriores a las acciones implementadas.

No obstante, por medio de la experiencia obtenida se propone la metodología seguida para las futuras evaluaciones. Este estudio demuestra la funcionalidad del satélite Sentinel-2 para el estudio del vigor de la masa forestal a través de índices de vegetación, debido a su alta resolución espacial en el visible y el infrarrojo (10 m) y temporal (frecuencia de revisita de 5 días con el reciente lanzamiento del Sentinel-2B), además de la mayor facilidad en su procesamiento a través del software SNAP y Sen2Cor desarrollado especialmente para ello, que si bien aún presenta algunos problemas de desarrollo informático, con el tiempo irá mejorando y permitiendo mayores funcionalidades.

La corrección topográfica constituye un proceso muy importante, para la determinación del índice SAVI, por el acusado relieve que presenta la zona de estudio. Se recomienda para futuros estudios, la implementación de la función de distribución de reflectancia bidireccional (BRDF en siglas en inglés), de mayor eficacia que el método empleado en este estudio. Este proceso es importante tanto para una sola escena cuando la combinación de diferentes coberturas de suelo, sol y ángulos de vista crean anisotropía y para múltiples escenas en las que el ángulo solar cambia (Li et al. 2010). Permitiendo así, la comparación cruzada de diferentes sensores (MODIS, VIIRS, AVHRR, LDCM, Landsat, Sentinel 2, etc.).

También en caso de utilizar imágenes Landsat 8 y poder compararlas con imágenes con una mayor resolución, es recomendable la implementación del Pansharpening, técnica que combina los datos pancromáticos de alta resolución (10 m) proporcionados por el producto Landsat, con los datos multiespectrales de media resolución (30 m) para crear una imagen multiespectral con características de mayor resolución.

En cuanto a los índices de vegetación utilizados en el presente estudio, como mencionan Rodríguez-Moreno y Bullock (2013) los índices NDVI y SAVI al derivarse de las mismas bandas espectrales y diferir en constantes arbitrarias, se encuentran estrechamente



relacionados y se ha demostrado en el presente estudio que para la zona de estudio, presentan comportamientos similares. Sin embargo, como mencionan los mismos autores, estos difieren en su sensibilidad a la corrección topográfica. A través del presente estudio, tras realizar la corrección topográfica, se confirma que la topografía del área de estudio influye en el desempeño del índice SAVI, no así en el NDVI.

Referencias

ANONINO.2016. Report on the implementation of Action B5 (Improve Forest Management) at la Obaga de Colldéu, site A la Muntanya d'Alinyà (FLCP). LIFE 11/ENV/ES/000535 - Operation CO2. Comisió UE.

CAMPELO DE SANTA, S.H. 2014. Estudio de biomasa forestal a través de herramientas de teledetección. Máster en Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Agroforestal. Escuela Técnica Superior de Ingenierías Agrarias. Universidad de Valladolid. Palencia.

CAO, L; LIU, T; WEI, L. 2014. A comparison of multi-resource remote sensing data for vegetation indices. Earth and Environmental Science 17: 1-7. doi:10.1088/1755-1315/17/1/012067

CHUVIECO, E. 2008. Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. Editorial Ariel. Barcelona.

Copernicus. s.f. Normalized Difference Vegetation Index [web en línea] Disponible desde Internet en <http://land.copernicus.eu/global/products/ndvi> con acceso el 07/05/2017 [con acceso el 26/04/2017].

ESA. 2016. Sentinel-2 User Handbook [publicación en línea] Disponible desde Internet en https://sentinel.esa.int/documents/247904/685211/Sentinel-2_User_Handbook [con acceso el 26/04/2017].

FAO. 2010. El Estado de los bosques del mundo. Bosques, actividad forestal y productos forestales para un futuro sostenible. Roma. 3: 26 – 46.



FARRIOL, R; ESCUTÉ, X; VIDAL, E; PALERO, N. s.f. La Muntanya d'Alinyà: un exemple de planificació forestal que integra gestió i conservació. XXXIII Jornades Tècniques Silvícoles Emili Garolera. Consorci Forestal De Catalunya [publicación en línea] Disponible desde Internet en http://lifepinassa.eu/wp-content/uploads/2016/10/Comunicaci%C3%B3-t%C3%A9cnica_Alinya.pdf [con acceso el 23/05/2017].

FISCHLIN, A., MIDGLEY, G.F., PRICE, J.T., LEEMANS, R., GOPAL, B., TURLEY, C., ROUNSEVELL, M., DUBE, O.P., TARAZONA, J., VELICHKO, A. 2007. Ecosystems, their Properties, Goods and Services. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

FLOOD, N. 2014. Continuity of Reflectance Data between Landsat-7 ETM+ and Landsat-8 OLI, for Both Top-of-Atmosphere and Surface Reflectance: A Study in the Australian Landscape. Remote sensing 6: 7952-7970.

FRANKLIN, S.E. 2001. Remote Sensing for Sustainable Forest Management. CRC Press. [Publicación en línea] Disponible desde Internet en https://books.google.es/books?id=K_LKBQAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=remote+sensing+and+forest+management&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjw54j-7orUAhUJCBoKHct2B5oQ6AEIKDAA#v=onepage&q=remote%20sensing%20and%20forest%20management&f=false [con acceso el 25/05/2017].

GAMON, J.A; HUEMMRICH, K.F; WONG. C.Y.S; ENSMINGER, I; GARRITY, S; HOLLINGER, D.Y; NOORMETS, A; PEÑUELAS, J. 2016. A remotely sensed pigment index reveals photosynthetic phenology in evergreen conifers. PNAS 46 (113): 13087–13092. doi: 10.1073/pnas.1606162113.

GARCÍA-FERRER, A. 2013. Potencialidades y nuevas orientaciones en el uso de la teledetección en la agricultura y selvicultura. Ambienta. 105: 6-15.

GARCÍA-GÜEMES, C; CALAMA, R. 2015. La práctica de la selvicultura para la adaptación al cambio climático. En: Herrero A y Zavala MA (eds). Los Bosques y la Biodiversidad frente al Cambio Climático: Impactos, Vulnerabilidad y Adaptación en España. pp, 501-512. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente, Madrid.



GILABERT, M.A; GONZÁLEZ-PIQUERAS, J; GARCÍA-HARO, J. 1997. Acerca de los índices de vegetación. Teledetección 8, 1-10.

HANTSON, S; CHUVIECO, E. 2011. Evaluation of different topographic correction methods for Landsat imagery. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation 13. 691–700.

Huete, A. R. 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). Remote Sensing of the Environment 25: 295-309.

IPCC. 2014 a. Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 pp.

IPCC. 2007b. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK.

KE, Y; IM, J; B, LEE, J; GONG, H; RYU, Y. 2015. Characteristics of Landsat 8 OLI-derived NDVI by comparison with multiple satellite sensors and in-situ observations. Remote Sensing of Environment 164: 298-313.

KORHONEN, L; HADI; PACKALEN, P; RAUTIAINEN, M. 2017. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 in the estimation of boreal forest canopy cover and leaf area index. Remote Sensing of Environment 195: 259–274.

LI, F; JUPP, D.L.B; REDDY, S; LYMBURNER, L; MUELLER,N; TAN,P; ISLAM, N. 2010. An Evaluation of the Use of Atmospheric and BRDF Correction to Standardize Landsat Data. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing 3 (3): 257-270.

LINDNER,M; MAROSCHEK, M; NETHERER, S; KREMER, A; BARBATI, A; GARCIA-GONZALO, J; SEIDL, R; DELZON, S; CORONA, KOLSTRO, M; LEXER, M ; MARCHETTI, M. 2010. Climate changes impacts, adaptive capacity and vulnerability of European forest ecosystems. Forest Ecology and Management. 259: 698-709.



MOISÉS, J; IBÁÑEZ, M; RODRÍGUEZ, R; OLARIETA, J.R. 2004. Estudi climatològic de la Vall d'Alinyà. En: Josep Germain i Otzet (ed.). Els sistemes naturals de la vall d'Alinyà. pp. 17-45. Institució Catalana d'Història Natural. Barcelona.

NASA. s.f. a. Landsat 7 Science Data Users Handbook [publicación en línea] Disponible desde Internet en https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf [con acceso el 27/05/2017].

PÉREZ, M. 2011. Aplicaciones de la Teledetección y SIG en la Caracterización de Humedales en la Reserva de la Biosfera de la Mancha Húmeda. Máster en Tecnologías de la Información Geográfica. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid. Madrid.

RODRÍGUEZ – MORENO, V.M; BULLOCK, S.H. 2013. Comparación espacial y temporal de índices de la vegetación para verdor y humedad y aplicación para estimar LAI en el Desierto Sonorense. Rev. Mex. Cienc. Agríc 4 (4): 611-623.

RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R; CALAMA, R; GARCÍA-GÜEMES, C; CÁMARA, A. 2009. Expected Climate Change Options for European Silviculture. Country report, Spain. Cost Action FP-0703 ECHOES [publicación en línea] Disponible desde Internet en http://docs.gip-ecofor.org/public/echoes/Echoes_SpanishReport-October2009.pdf [con acceso el 22/05/2017].

ROUSE, J.W; HAAS, R.H; SCHELL, A; DEERING, D.W. 1974. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS, In: S.C. Freden, E.P. Mercanti, and M. Becker (eds) Third Earth Resources Technology Satellite–1 Symposium. Volume I: Technical Presentations, NASA SP-351, NASA, Washington, D.C. 309-317.

SABATER, N; RUIZ-VERDÚ, A; DELEGIDO, J; FERNÁNDEZ-BELTRÁN, R; LATORRE-CARMONA, P; PLA, F; GONZÁLEZ-AUDÍCANA, M; ÁLVAREZ-MOZOS, J; SOLA, I; VILLA, G.; TEJEIRO, J; DE MIGUEL, E; JIMÉNEZ, M; MOLINA, S; MORENO, J. 2016. Desarrollo de productos avanzados para la misión SEOSAT/Ingenio. Revista de teledetección 47: 23-40.

SÁNCHEZ, L.F.; HERRERO, E; HERNÁNDEZ, S; CARRIÓN, P; GARIDO, F; MARCOS, J.L.; CLÉRIGO, Z. 2016. Proyecto LIFE+ Operación CO2: nuevas tecnologías aplicadas a la



obtención de créditos de carbono mediante reforestación, restauración y gestión forestal. Investigación Cualitativa en Ingeniería y Tecnología. 4: 53-63.

SENTINEL HUB. Sentinel 2 EO Products [web en línea] Disponible desde Internet en <http://www.sentinel-hub.com/apps/wms/wms-parameters/EOproducts> [con acceso el 07/05/2017].

SERRADA, R; AROCA, M.J; ROIG, S; BRAVO, A; GÓMEZ, V. 2011. Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático en el sector forestal. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid. [Publicación en línea] Disponible desde Internet en http://www.mapama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/impactos-vulnerabilidad-y-adaptacion/SECTOR_FORESTAL_DOCUMENTO_COMPLETO_tcm7-185468.pdf [con acceso el 24/05/2017].

SOBRINO, J.A; RAISSOUNI, N; KERR, Y; OLIOSO, A; LÓPEZ-GARCÍA.M.J; BELAID, A; EL KHARRAZ, M.H; CUENCA, J; DEMPERE, L.2000. Teledetección. Sobrino, J.A. Valencia, España. ISBN 84-370-4220-8.

TEILLET, P.M.; GUINDON, B; GOODENOUGH, D.G. 1982. On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. Canadian Journal of Remote Sensing 8(2): 1537-1540.

USGS. 2016. Landsat 8. Data user handbook [Publicación en línea] <https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/Landsat8DataUsersHandbook.pdf> [con acceso el 27/05/2017].



Máster en Tecnologías Avanzadas para el Desarrollo Agroforestal

Trabajo Fin de Máster: Evaluación mediante sensores remotos del impacto de las medidas silvícolas en Obaga de Coll de Deu (Llérida) en el vigor de la masa

ANEXOS