8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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

8CFE - 1110

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

Estudio y análisis del estado de un monte dominado por *Juniperus thurifera*, *Quercus pyrenaica* y *Fraxinus angustifolia* en decaimiento, mediante sensores espectrales, inventario y toma de muestras de campo, MUP 185 "La Dehesa" de Casla (Segovia).

GARCÍA MATEOS. Á.[1*], DUARTE NAVALÓN, M.[2], DEL BARRIO MARKAIDA, J.[3], FERNÁNDEZ MOVILLA, S.[2]

[1] Responsable de I+D+i del Grupo Igm-Zumain.
[2] Departamento de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT). Zumain Ingenieros.
[3] Director del Grupo Igm-Zumain.
* agarcia@zumain.es

Resumen

La zona de trabajo abarca 177 hectáreas del MUP185 *"La Dehesa"* en el TM de Casla, Segovia. La vegetación se compone de *Juniperus thurifera*, *Quercus pyrenaica* y *Fraxinus angustifolia*, con gran parte de los ejemplares trasmochados. La vegetación arbórea presenta un decaimiento generalizado de causas desconocidas, por lo que a lo largo de los años 2020 y 2021 se ha realizado un trabajo de seguimiento y caracterización de la masa en busca de posibles explicaciones.

El proyecto aúna la información recabada en dos campañas de inventario en campo, seis campañas de vuelo multiespectral y vuelo fotogramétrico RGB y dos de recogida de muestras para análisis en laboratorio. Empleando la información de los inventarios de campo y del vuelo fotogramétrico RGB se ha realizado una caracterización del entorno. A su vez, mediante los datos del sensor multiespectral se han digitalizado los pies que componen el monte, se ha estimado la especie y calculado su vigor vegetativo mediante índices espectrales.

Del análisis estadístico de intuye que el motivo del decaimiento puede estar relacionado con el suelo, pero no se puede afirmar debido al número reducido de muestras. Si ha permitido descartar que el decaimiento tenga una correlación con las características orográficas.

Palabras clave

RPAs, teledetección, sensores multiespectrales, sanidad forestal, gestión forestal, *machine learning*,

1. Introducción

Se entiende por teledetección la ciencia de adquirir y procesar la información de la cubierta terrestre a través de sensores y otros instrumentos instalados sobre plataformas espaciales, siendo hasta hace poco solo embarcados sobre aviones y dirigibles, aunque los grandes desarrollos en el campo de los drones o UAV han permitido embarcar este tipo de sensores permitiendo obtener unos resultados con mayor precisión y en un menor tiempo, convirtiéndose en la opción más viable a la hora de estudiar pequeñas extensiones de terreno.

La teledetección empleando sensores remotos se ha convertido en una metodología revolucionaria en campos como la agricultura de precisión, ya que ha cambiado la forma de cultivar optimizando recursos y aumentando la productividad de forma exponencial, este hecho ha derivado en una creciente aplicación de dicha metodología en el ámbito de la investigación. En los últimos años se ha producido un gran avance en el desarrollo de nuevos sensores de alta resolución debido a la electrónica de consumo, consiguiéndose de esta manera nuevos sensores multiespectrales que pueden ser embarcados en vehículos aéreos no tripulados (RPAS), este tipo de sensores son capaces de tomar hasta 5 bandas espectrales diferentes mediante el empleo de diferentes filtros.

2. Objetivos

El objetivo principal del presente proyecto de investigación fue la caracterización de un monte adehesado con síntomas de decaimiento mediante sensores multiespectrales embarcados en RPAs para identificar la causa o, al menos, descartar las estudiadas. Como objetivo secundario se marcó asignar la especie, de entre las especies principales inventariadas, de todos los pies del monte empleando para ello los valores espectrales y técnicas de aprendizaje automático (*machine learning*).

3. Metodología

Trabajo de campo

Vuelos multiespectrales

Se llevaron a cabo 6 campañas de vuelo, 3 en cada anualidad, con un sensor multiespectral embarcado en RPA y un sensor RGB, tal como recoge la Tabla 1. Todos los vuelos se realizaron una altura de vuelo constante de 120 metros sobre el terreno, superposición longitudinal y transversal del 80% y georreferenciación de los fotocentros de las imágenes. En los vuelos RGB se empleó un equipo con GNSS con solución RTK para garantizar una georreferenciación y precisión centimétrica en los productos de la fotogrametría.

Tabla 1. Fechas de vuelo multiespectral de las 6 campañas realizadas.

Año 2020		Año 2021	
Vuelo	Fecha	Vuelo	Fecha
1	14 julio	1	09 julio
2	21 agosto	2	03 septiembre
3	08 noviembre	3	04 noviembre

Inventario

Previo a la ejecución del inventario de campo se realizó una planificación en gabinete, donde apoyándose en el material recogido mediante los vuelos como ortofotos, modelos de escorrentías, modelos del terreno o modelos de orientaciones y recomendaciones aportadas por el personal cercano al monte de estudio, se escogieron aquellas zonas y árboles que definiesen estadísticamente el monte.

Planteadas ya todas las zonas quedó un total de 397 pies inventariados, 123 en el año 2020 y 274 en el año 2021, de los cuales nuestro equipo técnico en campo definió las características visuales de cada uno de los pies, como especie, diámetro, daños físicos, presencias de podas y trasmoches.

Toma de muestras

Las muestras de suelo se tomaron paralelamente a la realización del inventario de campo, conformando un total de 10 muestras. La cantidad de suelo recogido por cada muestra fue de 0.5 kg y a una profundidad de 20 centímetros

Gabinete fase 1

Caracterizaciones

Apoyándonos en la imagen RGB y complementando la información con distintas fuentes se llevó a cabo la caracterización preliminar del monte. Esta sirvió tanto para planificar las fases posteriores, identificando las zonas de interés, como para generar información con la que ampliar la base de datos con la que se trabajará en la Fase III.

Mediante fotogrametría aérea mediante RPAs se ha generado el Modelo Digital de Superficies (MDS) en el que están recogida la altitud de todas las copas de los árboles y, tras la clasificación del terreno, se generó el Modelo Digital del Terreno, en el que únicamente está representado el suelo. Empleando este MDT como base se ha caracterizado la orografía generando mapas de pendientes, orientaciones, red de drenaje y mapas de radiación solar. Junto a esto, restando ambos modelos, MDS - MDT, obtenemos el Modelo Digital de Alturas con el que estimar de la altura de los pies de la masa. A su vez, se identificaron las zonas donde se han realizado trasmochos sobre los ejemplares de *Quercus pyrenaica* y *Fraxinus angustifolia* junto con las zonas de mayor querencia por el ganado que frecuenta la dehesa.

Detección de pies muertos y decaídos

Mediante las ortofotografías RGB de alta resolución se han detectado los pies muertos en toda la zona de estudio, identificando como tal los que carecen de hoja por completo. A su vez, se han señalado los pies con anomalías en la copa, tales como puntisecos, con zonas de copa sin hoja o coloración no homogénea, clasificándolos de manera preliminar y general como “decaídos”. Este nombre ha sido asignado para diferenciarlos de los pies muertos con una denominación sencilla, pero en ningún caso se afirma a lo largo de este documento que estos pies estén a punto de morir o se prevé tal circunstancia. En total se han detectado 272 pies muertos y 1388 “decaídos”.

Gabinete fase 2

Esta segunda fase de gabinete se orientó a procesar, evaluar y depurar los datos multiespectrales obtenidos en las seis campañas de vuelo.

Calibración radiométrica

El primer paso para trabajar con imágenes multiespectrales fue convertir los valores digitales capturados por la cámara a valores normalizados de reflectancia en tanto por 1. Este paso es crucial ya que permite comparar imágenes capturadas en distintos momentos y con características de iluminación diferentes. La radiancia es el flujo de energía procedente de las superficies que se capturan en la imagen y que está correlacionada con las características de esa superficie y el entorno. El primer paso es convertir la radiancia medida por el sensor en valores digitales (DN) a unidades de flujo de energía (Wm-2sr-1) con las que poder estimar la reflectancia. La reflectancia de una superficie es la relación entre el flujo de energía recibido (irradiancia) y el fujo de energía emitido (radiancia) expresadas en tanto por uno.

En este proceso se han empleado paneles de calibración con reflectancias conocidas de 2%, 23% y 44% de la marca MosaicMill de un tamaño 50x50 cm. Estos paneles son objetivos que permiten realizar la calibración radiométrica de los datos obtenidos y transformarlos a valores de reflectancia normalizados. Están hechos de materiales con propiedades de reflectancia casi lambertiana y calibrados en laboratorio para las longitudes de onda adecuadas al sensor a utilizar. Se ha empleado la metodología recomendada por el fabricante de los sensores junto con los paneles de calibración antes descritos, generando de este modo una ortofotografía multibanda en valores de reflectancia.

Selección de vegetación

Con el objetivo de filtrar la información de interés fue necesario realizar una clasificación de las imágenes multiespectrales para eliminar los píxeles que no son de vegetación arbórea. Para ello se creó un script en código Python para agrupar los píxeles en función de la reflectancia en cada banda y seleccionar los que corresponden a la vegetación objeto de estudio. A su vez, empleando el modelo de altura de la vegetación, se descartó la vegetación no arbórea.

Filtrado de anomalías

Una vez transformados los ortomosaicos a valores de reflectancia se empleó el algoritmo de clasificación no supervisada K-means para separar los píxeles de la imagen en k clústeres basándose en los valores espectrales. Esto permitió seleccionar aquellos que contenían vegetación bien iluminada, descartando el resto tales como suelo, copa en sombra o tronco. Empleando el modelo de altura de la vegetación se realizó un segundo filtrado para seleccionar únicamente la vegetación de talla arbórea objetivo.

Cálculo de índices espectrales

Realizando operaciones entre los valores de reflectancia de las bandas espectrales se obtienen los llamados índices espectrales. Los índices espectrales son una combinación de dos o más bandas de la ortofotografía multiespectral que correlacionan con alguna o varias características de la vegetación. Se han generado un total de 18 índices espectrales: NDVI, NDRE, GNDVI, GCI, GRVI, MNLI, MSAVI2, MSR, NLI, OSAVI, RDVI, SAVI, SR, TDVI, WDRVI, PSRI, ARI2 y CRI2. Este volumen tan grande de información se ha generado pensando en la metodología a emplear para entrenar un modelo clasificador de especies, ya que los resultados del entrenamiento mediante *machine learning* se ven muy influenciados por el número de variables y muestras. Con el objetivo de medir un vigor vegetal único se han unificado los índices NDVI, NDRE, GNDVI en uno general denominado "Índice de vigor", al ser estos de los que se tiene mayor conocimiento. Este "Índice de vigor" es la media estandarizada de los 3 índices calculados y es la métrica mediante la cual se ha valorado de manera absoluta el vigor de cada pie, siendo los valores más altos de este índice indicativo de un mayor vigor. Finalmente, se asignó una clase de estado comparando el valor del "Índice de vigor" de cada pie en relación con el resto del monte permitiendo decir si está mejor o peor que los pies del entorno. La clasificación se realizó tal como se recoge en la siguiente tabla:

Tabla 2. Clasificación según vigor vegetal.

Clase de estado	Clasificador	Definición
1	$Vigor > [\overline{Vigor} + 2 * \sigma]$	Vigor muy por encima de la media
2	$[\overline{Vigor} + 2 * \sigma] < Vigor > [\overline{Vigor} + \sigma]$	Vigor por encima de la media
3	$[\overline{Vigor} + \sigma] < Vigor > [\overline{Vigor} - \sigma]$	Vigor en la media
4	$[\overline{Vigor} - \sigma] < Vigor > [\overline{Vigor} - 2 * \sigma]$	Vigor por debajo de la media
5	$Vigor < [\overline{Vigor} - 2 * \sigma]$	Vigor muy por debajo de la media

Este proceso se realizó para cada vuelo por separado para evaluar el vigor en los diferentes momentos de estudio y de manera conjunta en cada anualidad para obtener un vigor anual.

Extracción de valores medios de copa

Se ha realizado la digitalización manual al detalle de la copa de todos los pies inventariados ya que son los pies de los que más información disponemos. Mediante el software QGIS se ha extraído a las capas shapefile de cada pie la información relevante generada. El resultado son capas

de polígonos georreferenciadas con una base de datos asociada que se empleará en la Fase 3. Este procedimiento, aunque con menor detalle, también se aplicó a todos los pies del monte de los que se pudo discriminar la copa de manera unívoca. Aplicando esta metodología se identificaron aproximadamente 23.000 copas de las que se extrajo toda la información disponible de los productos generados anteriormente. Finalmente, se unificó toda la información recabada en el formato adecuado para poder trabajar con ella, generando varias tablas en formato Excel donde las columnas son las variables y las filas son cada uno de los pies de estudio con un ID único cada uno.

Gabinete fase 3

Modelo clasificador de especies

Utilizando la muestra de pies inventariados, de los que se conoce la especie, se realizó una selección de variables explicativas empleando el algoritmo de decisión Boruta que determina si una variable aporta información relevante, determinado 30 de ellas como relevantes. Para entrenamiento del modelo clasificador se separó el 80% de la muestra de pies inventariados y se reservó el 20% restante para la validación. Se evaluaron 10 algoritmos (Logistic Regression, Linear Discriminant Analysis, k-nearest neighbors Classifier, Decision Tree Classifier, Gaussian Naive Bayes, C-Support Vector Classification, Adaptive Boosting Classifier, Gradient Boosting Classifier, Random Forest Classifier, Extra Trees Classifier) de aprendizaje mediante validación cruzada empleando los datos de entrenamiento, tanto estandarizados como sin estandarizar. Finalmente, se realizó el ajuste de los parámetros del algoritmo de aprendizaje con mejor puntuación.

Análisis estadístico

En este apartado se generaron un conjunto de gráficos con los datos extraídos permitiendo observar la distribución de sus valores en busca de grupos de datos e identificar tendencias o distribuciones. Esto permite extraer indicios de si existe o no un problema y sus posibles causas. Además, se examinaron diferencias entre grupos y se evaluó la correlación entre las diferentes variables explicativas y el vigor vegetal. A su vez, se estudiaron los pies en un radio de 50 metros de cada muestra edáfica en busca de correlación entre el vigor y algún parámetro edáfico. Todos estos estudios se realizaron por cada taxón vegetal y año de forma independiente buscando reducir la influencia de estas características.

4. Resultados

Por una parte, el modelo clasificador de especie entrenado presenta una precisión de 0,91 en los datos de validación empleando 30 variables predictivas, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3. Resumen de resultados de la capacidad predictiva del modelo entrenado para clasificar la especie de árboles del MUP 185 a partir de imágenes multiespectrales tomadas desde dron. (0=Sabina, 1= Roble, 2=Fresno).

Entrenamiento					Validación				
		Observado					Observado		
		0	1	2			0	1	2
Predicho	0	99	3	1	Predicho	0	28	0	0
	1	3	95	4		1	3	23	3
	2	1	3	105		2	1	0	21
Precisión			95%		Precisión			91.13%	
Sensibilidad			95%		Sensibilidad			90,50 %	

En la Ilustración 1 se presenta la distribución de especies predichas por el modelo clasificador comparada con una imagen satelital de diciembre de 2021. Como se aprecia, las zonas marcadas

como roble se corresponden con las zonas sin follaje en diciembre. En las zonas de roble no se aprecia lo mismo.

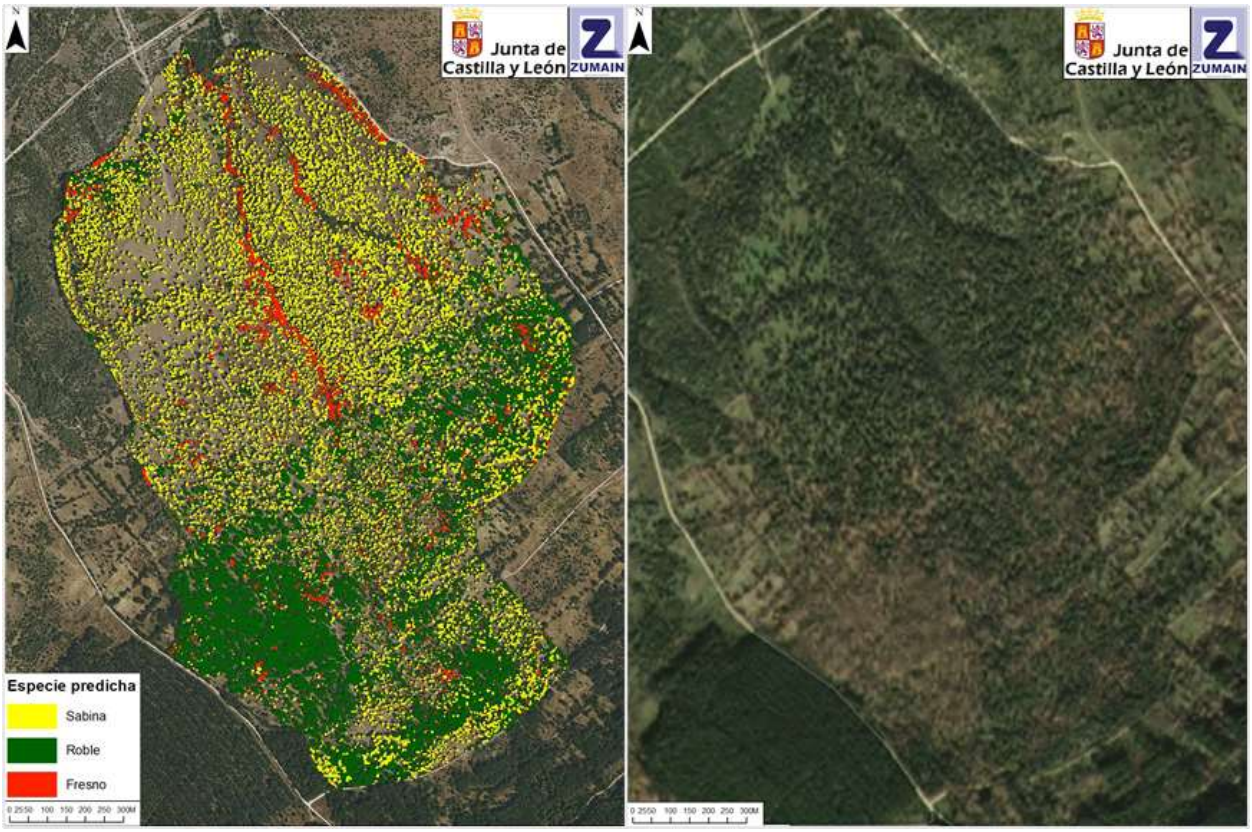


Ilustración 1. Distribución de especies predichas por modelo clasificador vs imagen satélite del 12 de diciembre de 2021.

Por otra parte, los resultados del estudio estadístico reflejan cierta correlación entre varias características y el vigor vegetal, siendo las más marcadas la litología, la altitud y la altura del pie.

En las siguientes ilustraciones se representan los resultados de las variables cuantitativas con mejor correlación con el vigor en forma de 12 matrices de correlación divididas según especie y año. Las 6 primeras relacionan las características de la vegetación con el vigor vegetativo y las clases de estado (Tabla 2). Las otras 6 restantes relacionan las características edáficas con el vigor vegetativo.

Además, se muestran 6 gráficos de barras, donde se muestra las clases de estado de cada pie en función de la litología donde están presentes. De nuevo se presenta un gráfico por cada año y especie. Para los robles se presenta también una gráfica por año relacionando la altura con el vigor vegetal.

Los análisis edáficos reflejan suelos ligeramente ácidos, esperables en una masa de rebollo, y sin problemas de salinidad. Por el contrario, se ha detectado un exceso de materia orgánica, niveles altos de nitrógeno y valores bajos y muy bajos de potasio y fósforo respectivamente.

Del mismo modo que en las otras características, se representan las matrices de correlación entre el vigor vegetal y los parámetros edáficos medidos en laboratorio. Hay que recordar que en este caso únicamente se han tenido en cuenta los pies en una parcela de 50 metros de radio con centro en el punto de muestreo. Los resultados muestran una alta correlación entre el vigor y los parámetros edáficos, con distinta intensidad entre los diferentes años y especies.

*Tabla 4. Matriz de correlación entre vigor y características de la vegetación y el medio para sabinas en el año 2021. Correlación por método de Pearson. Correlaciones con p-valor <0.05 señaladas con *.*

	Vigor vuelo 1	Vigor vuelo 2	Vigor vuelo 3	Vigor anual	Estado vuelo 1	Estado vuelo 2	Estado vuelo 3	Estado anual	Variación 2020-2021 V1	Variación 2020-2021 V2	Variación 2020-2021 V3	Variación 2020-2021 anual
Pendiente	0.04*	-0.04*	-0.19*	-0.07*	-0.04*	0.03*	0.16*	0.05*	0.22*	0.17*	0.09*	0.2*
Altitud	0.19*	0.1*	0.33*	0.23*	-0.15*	-0.06*	-0.28*	-0.18*	-0.18*	-0.36*	-0.17*	-0.29*
Altura vegetación	0.12*	0.18*	0.19*	0.18*	-0.12*	-0.15*	-0.16*	-0.15*	-0.05*	0.06*	0.09*	0.01
Orientacion	0.13*	0.11*	0.13*	0.13*	-0.11*	-0.09*	-0.1*	-0.11*	-0.02*	-0.14*	-0.15*	-0.13*
Radiación directa	0.06*	0.04*	0.06*	0.06*	-0.04*	-0.03*	-0.06*	-0.05*	0.0	-0.05*	-0.01	-0.03*
Radiación difusa	0.01	-0.04*	0.0	-0.01	-0.0	0.03*	0.0	0.01	-0.04*	-0.14*	-0.1*	-0.11*
Horas de radiación	-0.18*	-0.17*	-0.14*	-0.18*	0.16*	0.15*	0.15*	0.17*	-0.1*	-0.09*	-0.09*	-0.1*
Radiación total	0.06*	0.03*	0.06*	0.05*	-0.04*	-0.03*	-0.06*	-0.04*	-0.0	-0.07*	-0.02*	-0.04*
Distancia a cauce	0.17*	0.1*	0.25*	0.19*	-0.11*	-0.08*	-0.22*	-0.15*	-0.12*	-0.16*	-0.07*	-0.16*
Exposición	-0.08*	-0.08*	-0.09*	-0.09*	0.07*	0.06*	0.07*	0.08*	0.03*	0.07*	0.08*	0.07*
Zona de trasmoche	-0.18*	-0.03*	-0.01	-0.08*	0.15*	0.04*	0.0	0.06*	-0.0	-0.22*	-0.06*	-0.13*
Litología	0.13*	0.04*	-0.12*	0.02*	-0.14*	-0.06*	0.1*	-0.03*	0.2*	0.38*	0.22*	0.33*
Zona de ganado	0.01	-0.06*	0.03*	-0.01	0.01	0.06*	-0.01	0.01	0.03*	0.01	0.06*	0.05*

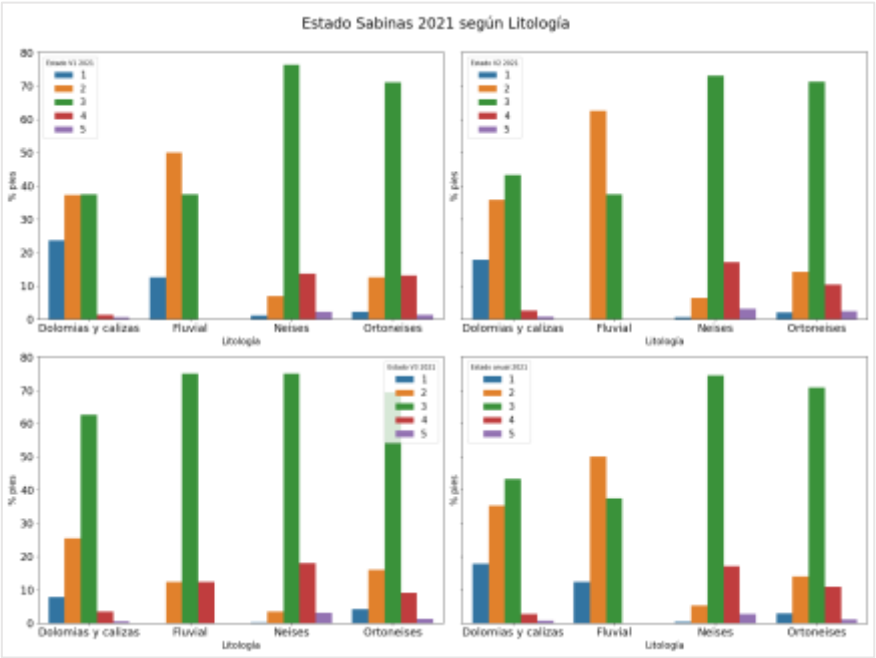


Ilustración 2. Distribución de clases de estado de las sabinas en las diferentes litologías en el año 2021.

*Tabla 5. Matriz de correlación entre vigor y características de la vegetación y el medio para sabinas en el año 2020. Correlación por método de Pearson. Correlaciones con p-valor <0.05 señaladas con *.*

	Vigor vuelo 1	Vigor vuelo 2	Vigor vuelo 3	Vigor anual	Estado vuelo 1	Estado vuelo 2	Estado vuelo 3	Estado anual	Variación 2020-2021 V1	Variación 2020-2021 V2	Variación 2020-2021 V3	Variación 2020-2021 anual
Pendiente	-0.21*	-0.24*	-0.3*	-0.29*	0.19*	0.22*	0.25*	0.24*	0.22*	0.17*	0.09*	0.2*
Altitud	0.38*	0.54*	0.52*	0.55*	-0.32*	-0.45*	-0.44*	-0.45*	-0.18*	-0.36*	-0.17*	-0.29*
Altura vegetación	0.19*	0.09*	0.08*	0.14*	-0.16*	-0.09*	-0.08*	-0.14*	-0.05*	0.05*	0.08*	0.01
Orientacion	0.16*	0.3*	0.3*	0.29*	-0.13*	-0.24*	-0.24*	-0.23*	-0.02*	-0.14*	-0.14*	-0.13*
Radiación directa	0.04*	0.11*	0.07*	0.08*	-0.04*	-0.09*	-0.06*	-0.07*	0.0	-0.05*	-0.0	-0.03*
Radiación difusa	0.04*	0.15*	0.11*	0.11*	-0.04*	-0.11*	-0.09*	-0.09*	-0.04*	-0.13*	-0.1*	-0.11*
Horas de radiación	-0.06*	-0.05*	-0.05*	-0.06*	0.06*	0.05*	0.06*	0.07*	-0.1*	-0.09*	-0.09*	-0.1*
Radiación total	0.04*	0.12*	0.08*	0.09*	-0.04*	-0.1*	-0.07*	-0.08*	-0.0	-0.07*	-0.02*	-0.04*
Distancia a cauce	0.27*	0.29*	0.34*	0.35*	-0.23*	-0.25*	-0.29*	-0.29*	-0.12*	-0.16*	-0.07*	-0.16*
Exposición	-0.12*	-0.19*	-0.19*	-0.19*	0.1*	0.14*	0.15*	0.14*	0.03*	0.07*	0.08*	0.07*
Zona de trasmoche	-0.17*	0.26*	0.06*	0.05*	0.15*	-0.21*	-0.05*	-0.06*	-0.0	-0.22*	-0.06*	-0.13*
Litología	-0.06*	-0.44*	-0.37*	-0.33*	0.06*	0.36*	0.32*	0.28*	0.19*	0.38*	0.22*	0.33*
Zona de ganado	-0.05*	-0.09*	-0.05*	-0.07*	0.04*	0.06*	0.05*	0.06*	0.03*	0.01	0.06*	0.05*

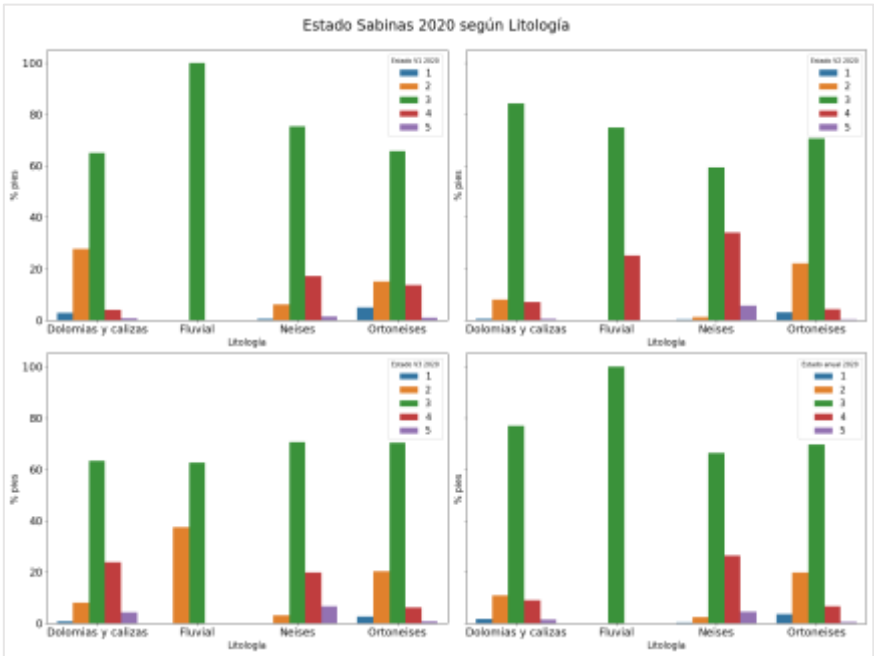


Ilustración 3. Distribución de clases de estado de las sabinas en las diferentes litologías en el año 2020.

*Tabla 6. Matriz de correlación entre vigor y características de la vegetación y el medio para robles en el año 2021. Correlación por método de Pearson. Correlaciones con p-valor <0.05 señaladas con *.*

	Vigor vuelo 1	Vigor vuelo 2	Vigor vuelo 3	Vigor anual	Estado vuelo 1	Estado vuelo 2	Estado vuelo 3	Estado anual	Variación 2020-2021 V1	Variación 2020-2021 V2	Variación 2020-2021 V3	Variación 2020-2021 anual
Pendiente	-0.07*	-0.22*	-0.27*	-0.22*	0.06*	0.18*	0.23*	0.18*	0.14*	-0.02	-0.05*	0.05*
Altitud	0.12*	0.02*	0.04*	0.07*	-0.11*	-0.0	-0.02	-0.06*	-0.05*	-0.15*	0.04*	-0.06*
Altura vegetación	0.2*	0.4*	0.39*	0.39*	-0.17*	-0.33*	-0.33*	-0.31*	-0.22*	0.01	0.12*	-0.09*
Orientacion	0.07*	0.04*	0.06*	0.07*	-0.06*	-0.03*	-0.04*	-0.05*	0.05*	-0.1*	-0.04*	-0.04*
Radiación directa	0.06*	0.03*	0.01	0.04*	-0.05*	-0.03*	-0.01	-0.04*	-0.02*	-0.04*	0.01	-0.02
Radiación difusa	0.09*	0.08*	0.05*	0.09*	-0.07*	-0.05*	-0.03*	-0.06*	-0.09*	-0.07*	0.03*	-0.07*
Horas de radiación	0.05*	-0.02	-0.07*	-0.02	-0.03*	0.03*	0.07*	0.02	-0.04*	-0.06*	0.02	-0.03*
Radiación total	0.07*	0.04*	0.02	0.05*	-0.06*	-0.03*	-0.01	-0.04*	-0.04*	-0.05*	0.02	-0.03*
Distancia a cauce	0.02	0.1*	0.17*	0.11*	-0.01	-0.07*	-0.11*	-0.08*	-0.05*	-0.12*	-0.09*	-0.12*
Exposición	-0.05*	-0.05*	-0.06*	-0.07*	0.04*	0.05*	0.06*	0.06*	0.03*	0.07*	-0.0	0.05*
Zona de trasmoche	0.05*	-0.04*	-0.02	-0.0	-0.04*	0.03*	0.0	0.0	0.14*	-0.0	-0.01	0.07*
Litología	0.07*	-0.03*	-0.04*	-0.0	-0.07*	0.02	0.02	0.0	0.14*	0.16*	0.02	0.14*
Zona de ganado	0.05*	-0.16*	-0.13*	-0.09*	-0.05*	0.13*	0.11*	0.07*	0.2*	-0.01	-0.05*	0.09*

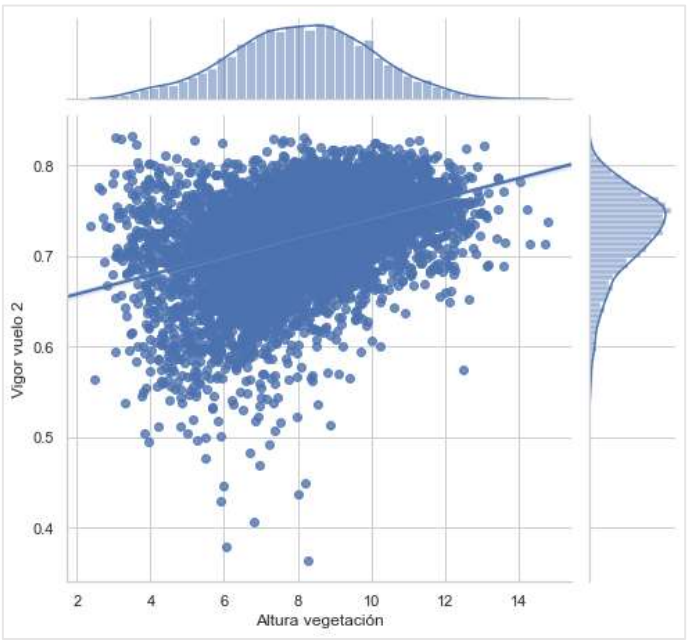


Ilustración 4. Diagrama de dispersión altura de la vegetación vs vigor vuelo 2 para robles en el año 2021.

*Tabla 7. Matriz de correlación entre vigor y características de la vegetación y el medio para robles en el año 2020. Correlación por método de Pearson. Correlaciones con p-valor <0.05 señaladas con *.*

	Vigor vuelo 1	Vigor vuelo 2	Vigor vuelo 3	Vigor anual	Estado vuelo 1	Estado vuelo 2	Estado vuelo 3	Estado anual	Variación 2020-2021 V1	Variación 2020-2021 V2	Variación 2020-2021 V3	Variación 2020-2021 anual
Pendiente	-0.25*	-0.2*	-0.23*	-0.28*	0.22*	0.17*	0.17*	0.23*	0.15*	-0.02	-0.05*	0.06*
Altitud	0.2*	0.19*	-0.01	0.16*	-0.16*	-0.17*	0.03*	-0.11*	-0.05*	-0.15*	0.04*	-0.06*
Altura vegetación	0.47*	0.4*	0.27*	0.47*	-0.42*	-0.32*	-0.2*	-0.4*	-0.22*	0.01	0.12*	-0.09*
Orientacion	-0.01	0.16*	0.1*	0.1*	-0.01	-0.14*	-0.08*	-0.08*	0.04*	-0.1*	-0.04*	-0.04*
Radiación directa	0.08*	0.1*	0.0	0.07*	-0.07*	-0.07*	0.01	-0.05*	-0.02	-0.04*	0.01	-0.02
Radiación difusa	0.18*	0.17*	0.01	0.15*	-0.17*	-0.13*	0.01	-0.12*	-0.08*	-0.07*	0.03*	-0.06*
Horas de radiación	0.07*	0.06*	-0.09*	0.02	-0.07*	-0.04*	0.09*	-0.01	-0.03*	-0.06*	0.01	-0.03*
Radiación total	0.1*	0.12*	0.0	0.09*	-0.1*	-0.08*	0.01	-0.07*	-0.03*	-0.05*	0.02	-0.03*
Distancia a cauce	0.09*	0.24*	0.27*	0.25*	-0.08*	-0.2*	-0.21*	-0.19*	-0.06*	-0.12*	-0.09*	-0.12*
Exposición	-0.1*	-0.14*	-0.06*	-0.12*	0.08*	0.12*	0.05*	0.11*	0.03*	0.07*	-0.0	0.05*
Zona de trasmoche	-0.17*	-0.03*	-0.0	-0.09*	0.12*	0.03*	-0.01	0.06*	0.14*	-0.0	-0.01	0.06*
Litología	-0.1*	-0.24*	-0.08*	-0.17*	0.1*	0.2*	0.04*	0.13*	0.15*	0.17*	0.02	0.14*
Zona de ganado	-0.22*	-0.16*	-0.08*	-0.19*	0.18*	0.12*	0.05*	0.15*	0.2*	-0.01	-0.05*	0.09*

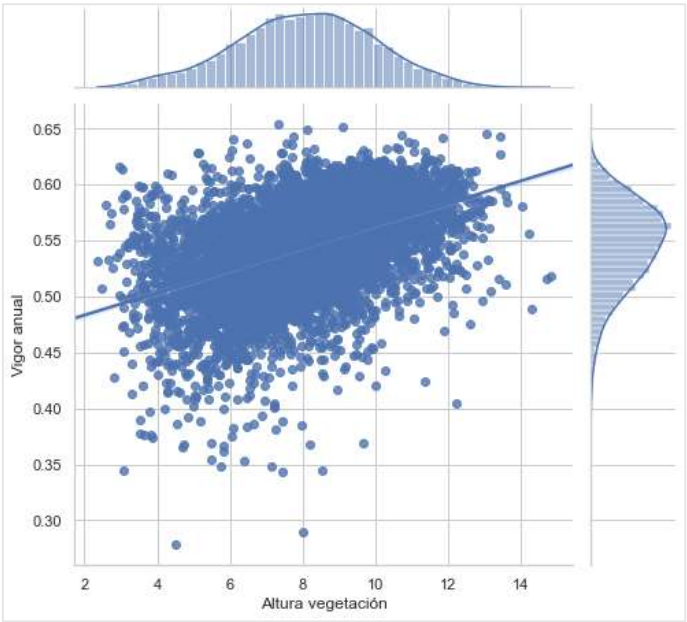


Ilustración 5. Diagrama de dispersión altura de la vegetación vs vigor anual para robles en el año 2020.

*Tabla 8. Matriz de correlación entre vigor y características de la vegetación y el medio para fresnos en el año 2021. Correlación por método de Pearson. Correlaciones con p-valor<0.05 señaladas con *.*

	Vigor vuelo 1	Vigor vuelo 2	Vigor vuelo 3	Vigor anual	Estado vuelo 1	Estado vuelo 2	Estado vuelo 3	Estado anual	Variación 2020-2021 V1	Variación 2020-2021 V2	Variación 2020-2021 V3	Variación 2020-2021 anual
Pendiente	-0.14*	-0.13*	-0.26*	-0.2*	0.13*	0.09*	0.21*	0.15*	0.13*	0.13*	0.01	0.15*
Altitud	-0.04	-0.01	0.23*	0.07*	0.06*	0.0	-0.2*	-0.05*	-0.36*	-0.38*	-0.17*	-0.39*
Altura vegetación	0.02	0.19*	0.17*	0.14*	-0.0	-0.16*	-0.16*	-0.11*	-0.21*	0.03	0.11*	-0.06*
Orientacion	0.11*	0.09*	0.18*	0.14*	-0.09*	-0.07*	-0.16*	-0.12*	-0.11*	-0.15*	-0.04*	-0.15*
Radiación directa	-0.02	-0.04	-0.02	-0.03	0.01	0.05*	0.0	0.02	-0.03	-0.05*	0.04	-0.01
Radiación difusa	-0.11*	-0.12*	-0.04*	-0.1*	0.11*	0.11*	0.03	0.09*	-0.17*	-0.11*	-0.02	-0.12*
Horas de radiación	-0.18*	-0.15*	-0.05*	-0.14*	0.17*	0.13*	0.05*	0.13*	-0.18*	-0.11*	-0.02	-0.12*
Radiación total	-0.04	-0.06*	-0.02	-0.04*	0.03	0.06*	0.01	0.03	-0.06*	-0.07*	0.03	-0.03
Distancia a cauce	0.17*	0.1*	0.13*	0.15*	-0.13*	-0.09*	-0.12*	-0.13*	-0.02	-0.09*	-0.08*	-0.08*
Exposición	-0.02	-0.02	-0.05*	-0.03	0.01	0.02	0.04	0.02	0.09*	0.03	0.05*	0.07*
Zona de trasmoche	-0.03	0.04*	0.08*	0.03	0.02	-0.04	-0.07*	-0.03	0.04	-0.17*	0.04*	-0.08*
Litología	0.06*	-0.02	-0.16*	-0.04*	-0.06*	0.02	0.14*	0.03	0.23*	0.32*	0.09*	0.29*
Zona de ganado	-0.0	-0.15*	0.02	-0.05*	0.01	0.14*	-0.0	0.04	0.07*	-0.12*	-0.02	0.01

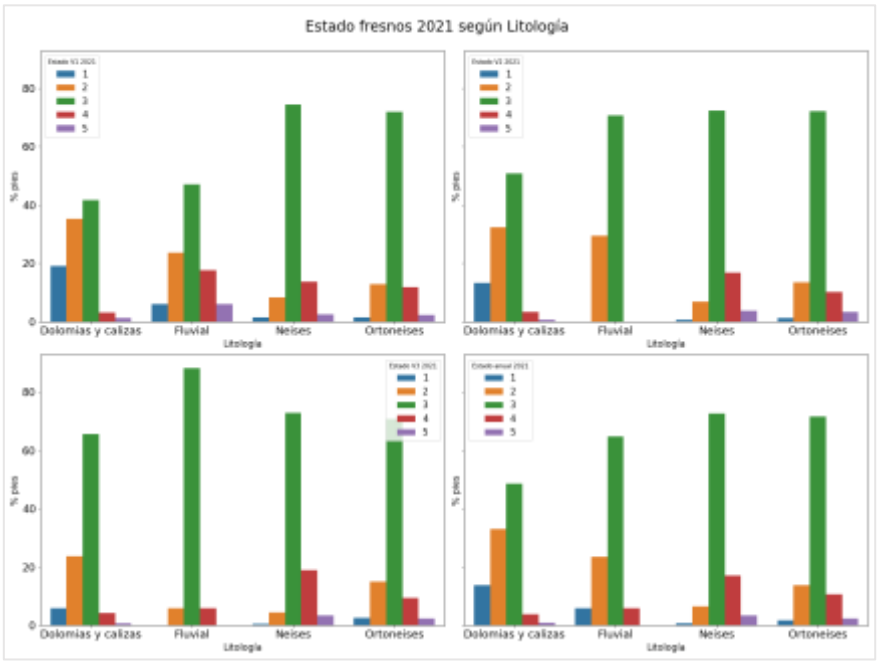


Ilustración 6. Distribución de clases de estado de los fresnos en las diferentes litologías en el año 2021.

*Tabla 9. Matriz de correlación entre vigor y características de la vegetación y el medio para fresnos en el año 2020. Correlación por método de Pearson. Correlaciones con pvalor<0.05 señaladas con *.*

	Vigor vuelo 1	Vigor vuelo 2	Vigor vuelo 3	Vigor anual	Estado vuelo 1	Estado vuelo 2	Estado vuelo 3	Estado anual	Variación 2020-2021 V1	Variación 2020-2021 V2	Variación 2020-2021 V3	Variación 2020-2021 anual
Pendiente	-0.32*	-0.25*	-0.27*	-0.33*	0.26*	0.22*	0.22*	0.29*	0.13*	0.13*	0.02	0.16*
Altitud	0.36*	0.48*	0.41*	0.48*	-0.32*	-0.39*	-0.37*	-0.4*	-0.36*	-0.37*	-0.17*	-0.39*
Altura vegetación	0.22*	0.15*	0.09*	0.17*	-0.22*	-0.12*	-0.06*	-0.17*	-0.22*	0.03	0.11*	-0.06*
Orientacion	0.25*	0.29*	0.25*	0.31*	-0.2*	-0.23*	-0.2*	-0.25*	-0.1*	-0.15*	-0.04	-0.15*
Radiación directa	0.01	0.03	-0.06*	-0.01	-0.03	-0.01	0.04	0.01	-0.04	-0.05*	0.03	-0.01
Radiación difusa	0.05*	0.05*	-0.03	0.02	-0.07*	-0.01	0.02	-0.02	-0.17*	-0.11*	-0.02	-0.12*
Horas de radiación	0.02	0.01	-0.03	-0.0	-0.03	0.01	0.03	0.02	-0.18*	-0.11*	-0.02	-0.12*
Radiación total	0.02	0.03	-0.06*	-0.01	-0.03	-0.01	0.04	0.0	-0.06*	-0.06*	0.03	-0.03
Distancia a cauce	0.22*	0.23*	0.26*	0.28*	-0.15*	-0.17*	-0.2*	-0.2*	-0.03	-0.08*	-0.08*	-0.08*
Exposición	-0.13*	-0.1*	-0.12*	-0.13*	0.1*	0.05*	0.08*	0.08*	0.09*	0.03	0.05*	0.07*
Zona de trasmoche	-0.08*	0.3*	0.02	0.09*	0.06*	-0.22*	-0.03	-0.09*	0.03	-0.18*	0.04	-0.08*
Litología	-0.17*	-0.45*	-0.23*	-0.32*	0.18*	0.36*	0.23*	0.29*	0.23*	0.32*	0.09*	0.29*
Zona de ganado	-0.06*	-0.0	0.04*	-0.0	0.08*	0.01	-0.02	0.04	0.07*	-0.12*	-0.02	0.01

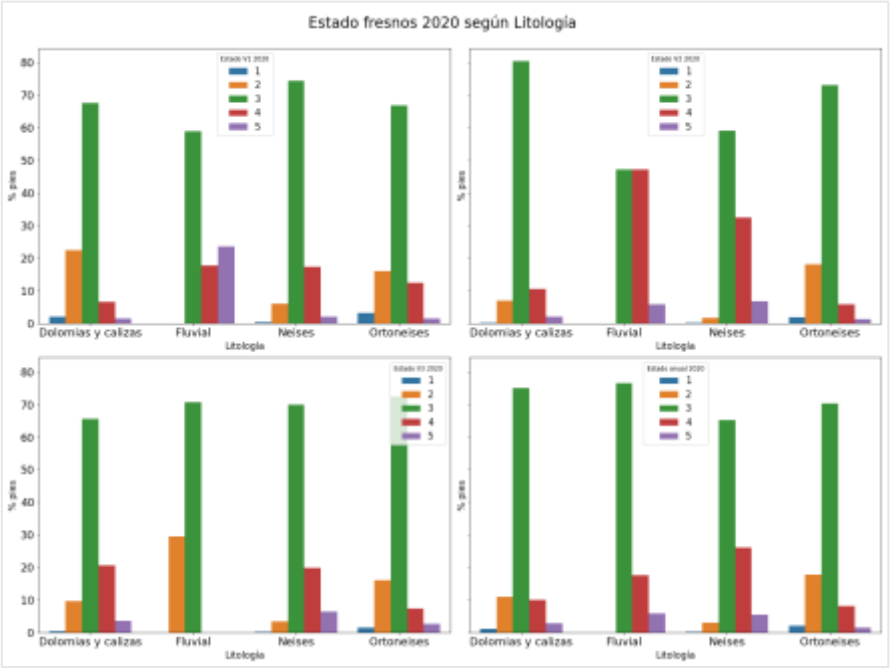
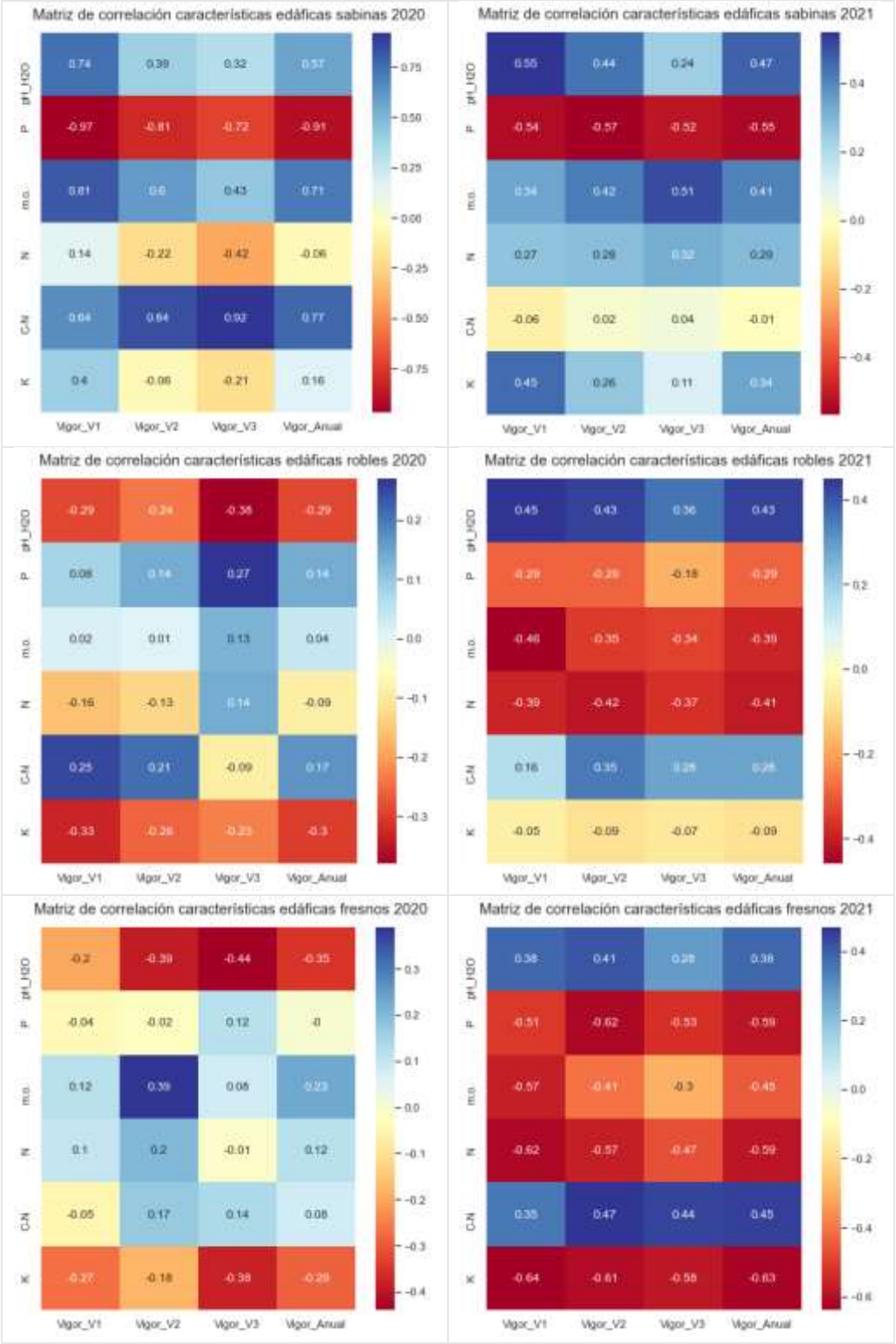


Ilustración 7. Distribución de clases de estado de los fresnos en las diferentes litologías en el año 2020.

ANÁLISIS EDÁFICO

*Tabla 10. Matrices de correlación de características edáficas vs vigor vegetativo por especie y año. Correlación por método de Pearson. Correlaciones con pvalor<0.05 señaladas con *.*



5. Discusión

La clasificación de especies arroja buenos valores de precisión y sensibilidad en los datos de validación y, además, la distribución de especies predicha concuerda con lo conocido hasta el momento sobre el monte y la imagen satelital de diciembre, lo que parece validar la metodología usada. Si se pretende mejorar estos resultados habría que realizar un muestreo al azar estratificado hasta obtener una muestra de validación balanceada, con un mayor tamaño de los datos [1].

El resultado de los análisis de correlación entre el vigor vegetal y las características de la vegetación no permiten determinar la causa del decaimiento vegetal. Hay indicios de que los *Q. pyrenaica* de mayor altura tienen mayor vigor vegetal pero no se puede afirmar que sea efecto de alguna afección o que tenga relación con la dominancia de unos sobre otros. Esta última afirmación puede ser la menos probable al no haber encontrado correlación entre el vigor y la radiación solar recibida por cada pie. Del mismo modo, parece existir una correlación entre el vigor vegetal de *J. thurifera* y *F. angustifolia* y la litología sobre la que vegetan [2]. Las litologías silíceas dominan en gran parte del monte por lo que el taxón *J. thurifera* podría verse afectado ya que presenta cierta querencia por los suelos calizos. En cuanto a *F. angustifolia*, su distribución está limitada a los cauces y arroyos que no se ven representados en el mapa litológico debido a la resolución.

Los valores edáficos medidos presentan desequilibrios importantes y, a su vez, altas correlaciones con el vigor vegetal, pero sería necesario ampliar el número de muestras para obtener resultados estadísticamente significativos [5]. Si bien no se puede afirmar que estos valores anómalos sean la causa final o vengan inducidos por otra afección no detectada, podría ser un indicio de que la afección que provoca el decaimiento está relacionada con el suelo [2].

6. Conclusiones

El uso de teledetección multiespectral mediante RPAs se ha revelado como una herramienta de gran utilidad [6] para la caracterización de montes adehesados [8]. La mayor ventaja detectada es el grado de resolución del estudio de la vegetación [4], trabajando a nivel de pie individual. Junto a esto, realizando un inventario relativamente pequeño, 400 pies en un monte de 180 hectáreas y más de 20.000 pies, se ha extraído suficiente información para calibrar un modelo clasificador de especies para el resto del monte con una elevada precisión (Tabla 3).

La fotogrametría mediante RPAs esquipado con GNSS con solución RTK y sensor óptico de gran resolución permitió modelizar de manera precisa tanto el terreno como la vegetación, caracterizando la orografía y parámetros físicos de la vegetación, tales como la altura del pie y la radiación solar que recibe la copa. La discriminación por especie fue fundamental a la hora de estudiar el vigor vegetal mediante índices espectrales y su correlación con los distintos parámetros físicos del entorno, ya que las diferentes especies estudiadas responden a variaciones de estos parámetros de maneras diferentes.

Este trabajo muestra como con una metodología depurada e integrando conocimientos de distintas áreas, se ha podido estudiar la población al completo de un monte de 180 hectáreas en 6 momentos diferentes a lo largo de dos años con un rendimiento y coste imposible mediante otras técnicas, fundamentalmente por la ventaja operativa que dan los RPAs y los sensores adaptados. Aunque la evolución de los instrumentos para teledetección que equipan nuevos satélites hace prever que a medio plazo serán capaces de realizar un estudio a esta resolución, a día de hoy no permiten el estudio pie a pie realizado [3]. Del mismo modo, realizar este trabajo como indica Bahe M. et al., mediante inventarios tradicionales, además de tener un coste difícilmente asumible por los gestores, no resultaría en información cuantificable del vigor de cada pie, que es un dato objetivo y comparable bajos los mismos criterios en momentos temporales diferentes.

Destacar que mediante estas herramientas se ha podido obtener una "imagen inicial de referencia" para poder hacer una comparativa en el futuro con el momento actual, así como para poder dirigir los esfuerzos de vigilancia y control por parte de los gestores. A su vez, esta misma metodología es fácilmente extrapolable a otros entornos, y pueden ser de gran ayuda para monitorizar y seguir enclaves de gran valor, importancia o en riesgo [7].

7. Agradecimientos

Los autores agradecen en primer lugar a la Junta Castilla de Castilla y León, al Parque Natural Sierra Norte de Guadarrama y al Servicio Territorial de Medio Ambiente de Segovia, en especial a Patricia Riquelme Osado y a Judit Maroto de Mercado por promover este trabajo. Agradecer al Servicio de Restauración y Gestión Forestal y a Javier Ezquerra Boticario por su confianza y apoyo en la realización del trabajo.

Por último, agradecer a todo el personal del Grupo Igm-Zumain que ha colaborado en ese proyecto, en especial a Sergio Casado Sevillano y David Muñoz Morón, por su gran trabajo de campo y apoyo en gabinete estos dos años, así como a los socios del Grupo Igm-Zumain, en su apuesta constante por el I+D+i, basada en la creencia de que la investigación es la mejor vía para el progreso.

8. Bibliografía

Blanco, E.; Bonet Lledos, J. A.; Eizaguirre Altuna, M.; 2009; Uso de imágenes satélite Landsat para la detección de rodales de Pinus nigra Arn. y Pinus sylvestris L. afectados por escolítidos. Investigación agraria. Sistemas y recursos forestales, 2009, vol. 18, núm. 3, p. 264-275.

(Bahe, M. M.); (Murphy, R. L.); (Russell, M. B.); (Knight, J. F.); (Johnson, G. R.); 2021; Suitability of a single imager multispectral sensor for tree health analysis. Urban Forestry & Urban Greening, 63, 127187.

(Będkowski, K.); (Stereńczak, K.); 2013; Sessile oak (Quercus petraea (Mattuschka) Liebl.) trees variability according to an analysis of multispectral images taken from UAV–first results. Ecological Questions, 17, 25-33.

(Cerrillo, R. M. N.); (de la Orden, M. S.); (Ferrer, A. G., & Cano, F.); 2005; Evaluación de la defoliación mediante imágenes IKONOS en masas de Quercus suber L. en el sur de España. Forest Systems, 14(2), 242-252.

(Macedo, F. L.); (Sousa, A. M.); (Gonçalves, A. C.); (Marques da Silva, J. R.); (Mesquita, P. A.); (Rodrigues, R. A.); 2018; Above-ground biomass estimation for Quercus rotundifolia using vegetation indices derived from high spatial resolution satellite images. European Journal of Remote Sensing, 51(1), 932-944.

(Deur, M., Gašparović, M.); (Balenović, I.); 2020; Tree Species Classification in Mixed Deciduous Forests Using Very High Spatial Resolution Satellite Imagery and Machine Learning Methods. Remote Sensing, 12(23), 3926.

(Jordan, J.); (Angelopoulou, E.); 2010; Gerbil-A Novel Software Framework for Visualization and Analysis in the Multispectral Domain. In VMV (pp. 259-266).

(Navarro-Cerrillo, R. M.); (Varo-Martínez, M. Á.); (Acosta, C.); (Rodriguez, G. P.); (Sánchez-Cuesta, R.); (Gomez, F. J. R.); 2019; Integration of WorldView-2 and airborne laser scanning data to classify defoliation levels in Quercus ilex L. Dehesas affected by root rot mortality: Management implications. Forest Ecology and Management, 451, 117564.