

CONAMA 2022

CONGRESO NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE

Detección temprana de plagas y enfermedades forestales mediante técnicas de teledetección y sensor hiperespectral embarcado en RPA



CONAMA 2022

DETECCIÓN TEMPRANA DE PLAGAS Y ENFERMEDADES FORESTALES MEDIANTE
TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN Y SENSOR HIPERESPECTRAL EMBARCADO EN RPAS

Autor Principal: Juan del Barrio Markaida (IGM)

Otros autores: Álvaro García Mateos (IGM), María Duarte Navalón (Zumain Ingenieros);
Santiago Fernández Movilla (Zumain Ingenieros); David Muñoz Morón (Zumain Ingenieros).

ÍNDICE

1. Resumen.....	2
2. Proyecto	3
2.1. Introducción	3
2.2. Objetivos	5
2.3. Metodología.....	5
2.4. Resultados	7
2.4.1. Pino	7
2.4.2. Nogal.....	10
2.4.3. Dehesa	12
2.5. Discusión	14
2.6. Conclusiones.....	16
3. Bibliografía	17

1. RESUMEN

El cambio climático es un problema a nivel global, referente al cambio a largo plazo de las temperaturas y, en general, de los patrones climáticos en la tierra. Estos cambios se producen de forma natural, no obstante, la acción humana ha acelerado enormemente este proceso lo que dificulta la adaptación de las masas forestales a las nuevas situaciones climáticas.

El decaimiento de los montes es uno de los efectos más preocupantes de la modificación del clima, que a su vez favorece la entrada de plagas capaces de afectar incluso a individuos sanos. Por ello, resulta cada vez más imprescindible el apoyo de sistemas y herramientas que ayuden a la detección temprana de plagas, enfermedades y, en general, síntomas de decaimiento que permitan la pronta actuación y garanticen la sostenibilidad y perdurabilidad de las masas que ya han sido debilitadas.

Tomando como base las anteriores premisas, el objetivo del presente proyecto ha sido validar la eficacia de los sensores hiperespectrales para la detección temprana de plagas y predicción del decaimiento de las masas, permitiendo tomar acciones de recuperación y contención contra los efectos del cambio climático.

Para ello se seleccionaron masas arboladas con presencia de diferentes síntomas de decaimiento entre los años 2019 y 2021. El proyecto se compone de las siguientes localizaciones: Un rodal de *Pinus pinaster* compuesto por pies con síntomas de afección por agente fúngico en el T.M de Rábano de Aliste en Zamora; Varias parcelas con síntomas de decaimiento compuestas por *Pinus pinaster*, situadas en T.M de Alorcillo, Zamora; Una plantación de nogal con afección de *Oomycte Phytoptora* en el término municipal de Villagarcía de Campos, Valladolid; varias parcelas en M.U.P 185 "La Dehesa" en el T.M de Casla, Segovia, con síntomas de decaimiento por causas desconocidas y una zona piloto sana.

En todos los casos se realizó una evaluación visual, identificando un número representativo de los árboles de la muestra y se realizaron vuelos con un sensor hiperespectral de 272 bandas en diferentes momentos del periodo estival. El número de vuelos se adaptó en función de especie, afección y localización. Posteriormente se unificaron los datos tomados por inventario tradicional y técnicas de teledetección con drones para comprender la implicación de los diferentes parámetros bióticos y físicos en la salud vegetal de las masas arboladas. Con todo ello se buscaron índices que permitieran evaluar el vigor vegetal y aproximar las causas del decaimiento de las masas.

2. PROYECTO

2.1. Introducción

El cambio de las condiciones climáticas es un evento natural que se desarrolla a largo plazo y afecta a todos los elementos del sistema climático. Sin embargo, entendemos por cambio climático a los cambios del clima por efecto directo o indirecto de la actividad humana. Los efectos adversos provocado por el cambio climático son un problema a nivel global, que afecta tanto a los ecosistemas naturales como a los sistemas socioeconómicos. [1]

La gran diversidad de ecosistemas existentes en el planeta hace que las características requeridas por los seres vivos para habitar en determinadas partes del mundo sean muy diferentes entre sí. Con el transcurso de los años, la presión que el ambiente ejerce sobre las plantas y animales convierte la persistencia de la especie en una carrera por la supervivencia, lo que garantiza la permanencia de los más aptos. [2] Por ello las especies van lentamente, adaptándose a las particularidades medio en el que viven.

La aceleración del cambio climático de mano de la acción antropogénica rebasa la capacidad de adaptación del medio natural, en especial de las plantas que no cuentan con la capacidad para desplazarse a mejores territorios.

Durante el último siglo el planeta se ha calentado de forma anómala, sobre todo en las últimas dos décadas, alcanzando 1,02°C sobre los valores preindustriales [3]. Los estudios alertan del riesgo que supondría superar los 1,5°C y de los efectos irreversibles que podría tener alcanzar una temperatura de 2°C sobre los valores preindustriales.

Uno de los efectos de este calentamiento es el aumento de la periodicidad de las sequías y olas de calor, constituyéndose como uno de los desencadenantes de los procesos de decaimiento forestal de presente y futuro, llegando a observar en los casos más extremos eventos de mortalidad masiva y pérdida de ecosistemas en algunos territorios [4].

Además, el grado de decaimiento de las formaciones vegetales provoca una acusada vulnerabilidad, lo que ofrece a los organismos patógenos una oportunidad de ataque, llegando a desembocar en la muerte de los huéspedes.

Aunque consigamos mitigar el aumento de la temperatura mediante tratados internacionales como el Acuerdo de París y la puesta en marcha de planes y acciones climática, el grado de decaimiento actual ya provoca una acusada vulnerabilidad que tiende a incrementarse.

Tras el fortalecimiento y reproducción anormalmente elevada de estos organismos en los focos decaídos cada vez más frecuentes, estos organismos pueden expandirse a masas de árboles sanos con mayor facilidad, aumentando el alcance y efectos del problema inicial.

En la actualidad, necesitamos empezar a trabajar en herramienta de apoyo para la gestión forestal, que permita la pronta de detección de las plagas y enfermedades oportunistas y permita tomar medidas de prevención, contención y rectificación ante el inminente problema de salud forestal previsto por los expertos.

Por ello, los dos últimos años IGM ha invertido esfuerzos en estudiar el uso de la tecnología hiperespectral para la detección temprana de plagas. En concreto, se han estudiado 4 localizaciones donde la masa forestal muestra síntomas de decaimiento o afección visualmente apreciables por los técnicos y agentes:

- Masa de nogal, *Juglans regia*, en el municipio de Villagarcía de Campos compuesta por variedades Chandler y Howard como productoras y Fernette como polinizadora. La parcela de estudio llevaba varios años afectada por un Oomyceto de género *Phytophthora*, este patógeno entró mediante una reposición de marras que contenía el agente infeccioso y que se extendió por gran parte de la parcela.
- Masa de pinaster, *Pinus pinaster*, con síntomas de decaimiento. Esta masa cuenta con 3 localizaciones, la primera de ellas en el municipio de Alcorcillo, donde se identifica a la acción del hongo *Heterobasidion annosum* o *Armillaria mellea*, difíciles de distinguir a simple vista. La segunda con síntomas de decaimiento en el municipio de Sejas de Aliste donde se intuye la acción de un agente fúngico desconocido y, la tercera y última, en el municipio de Alcañices donde se colocan las parcelas de validación.
- Dehesa mixta en el municipio de Casla, Segovia, compuesta por sabina, *Juniperus thurifera*, roble, *Quercus pyrenaica* y fresno, *fraxinus angustifolia*. La dehesa muestra síntomas de decaimiento sin un motivo claramente definido, además de la presencia de *Cerambyx*. Históricamente se han realizado tratamientos culturales de trasmucho en las masas de roble...



Figura 1. Mapa de localización de parcelas. (IGM-Zumain)

La Phytophthora es un género y enfermedad fúngica capaz de atacar a un gran número de especies tanto forestales como agrícolas, contando con múltiples especies especializadas en sus huéspedes. se propaga a través del suelo y puede permanecer en latencia durante años, activándose en situaciones favorables para su expansión. La Phytophthora penetra a través de las raíces, ocupando los vasos vasculares lo que dificulta la circulación de la savia. En consecuencia, se produce un marchitamiento generalizado, así como la progresiva muerte de los tejidos. Los síntomas más comunes son: marchitamiento y clorosis en hojas y pudrición en tallo y cuello de las plantas, así como manchas oscuras, agujeros y gomosis.

Heterobasidion annosum ataca principalmente a coníferas, encontrándose muy extendido por regiones templadas del hemisferio norte. Está considerado como un patógeno peligroso capaz de inducir la muerte de los pies. Antes de eso provoca podredumbres de raíz y tronco, además de la reducción del volumen maderable en las masas forestales productivas. El hongo puede vivir durante largo tiempo como saprófito en tocones ya infectados. No obstante, cuando las esporas sexuales entran en contacto con heridas de poda u otros daños del tronco comienza la infección que, más adelante, puede expandirse a árboles sanos a través del contacto radicular.

Además de la pudrición radicular los síntomas externos asociados pueden ser: falta de crecimiento, resinación en la parte inferior del tronco, caída de las acículas y clorosis. Las muertes suelen producirse por zonas con formas circulares.

Tanto Phytophthora como Heterobasidion se consideran hongos muy difíciles de detectar debido a su forma de expansión y el tiempo que transcurre hasta que muestras síntomas visibles, cuando la enfermedad se encuentra muy avanzada.

En las masas forestales, como es el caso de los pinares estudiados, el debilitamiento de la masa, sumado a la falta de atención prestada al monte, puede atraer la atención de otro tipo de plagas que aceleren la mortalidad de los individuos y favorezcan la expansión de los agentes fúngicos.

Los perforadores son pequeños coleópteros voladores con gran capacidad de dispersión. Los coleópteros del género ips se alimentan del floema, situado en la capa interior de la corteza de los árboles. Suelen habitar en árboles muertos, pero pueden colonizar árboles debilitados por sequía, heridas, actividad humana u otras plagas. La presencia de Ips puede causar la muerte del árbol si corta completamente el transporte de sustancias nutritivas a través de los vasos. Además, los Ips portan esporas de hongos que pueden terminar de matar al árbol.

Los síntomas de infestación incluyen la presencia de agujeros de entrada en el tronco del árbol, así como partículas de polvo de madera que se acumula en el exterior, consecuencia de la excavación de las galerías.

2.2. Objetivos

El objetivo principal de este estudio es demostrar la capacidad de la tecnología hiperespectral para su utilización en la detección temprana de plagas, incluso antes de que los pies afectados muestren síntomas visibles y su aplicabilidad en la sostenibilidad de los ecosistemas.

2.3. Metodología

Para la consecución de estos objetivos se emplea una metodología solidaria a todas las parcelas de estudio, particularizada a cada caso según las necesidades específicas.

La metodología general incluye una primera fase de reconocimiento en campo en la que se identifican las zonas de mayor decaimiento y se toman muestras de laboratorio para confirmar la presencia del patógeno esperado. También se toman muestras de suelo para descartar problemas en su composición. Además, se realiza un inventario de campo donde se extraen las variables más importantes, en especial especie, tratamientos culturales y grado de afección visual. Para evitar problemas en la posterior identificación en gabinete se marcan los vértices de cada parcela, se identifican los pies con un ID unívoco y se toman las coordenadas de cada pie con GPS.

Como norma general se coloca al menos una parcela en una zona de validación, es decir, un área lejos del foco principal de afección que no muestre síntomas visibles de decaimiento. El resto de parcelas se colocan en las zonas de afección.

Para la realización de los vuelos hiperespectrales se empleó un RPA DJI Matrice 600 Pro que se adaptó para integrar el sensor hiperespectral nano-Hyperspect de la marca Headwall. Este sensor cubre las longitudes de onda de 400 a 1000 nm mediante 272 bandas espectrales, 640 bandas espaciales y una dispersión de 2,2 nm/píxel.

La programación de los vuelos se realizó a una altura constante sobre el terreno siempre menos a los 120 metros de altura, obteniendo imágenes espectrales con un Ground Sampling Distance (GSD) próximo a los 5 cm/píxel. A esta altura el ancho que captura el sensor es de aproximadamente 32 metros abarcando una parcela de 20 metros con margen suficiente a ambos lados. El calendario de vuelos se adaptó a las condiciones meteorológicas y ambientales, evitando días de lluvia y viento por seguridad de la operación y priorizando días soleados para una mejor calidad en la captura de datos.

Para garantizar la integridad de los datos capturados, los vuelos se realizaron en las horas centrales del día y con cielo despejado. Además, para poder realizar la calibración radiométrica en la fase de procesado se obtuvieron las medidas absolutas de reflectancia mediante la calibración de la exposición del sensor en campo y se emplearon 3 paneles de calibración de reflectancia conocida del 2% 23% y 44%.

Una vez obtenidas las imágenes hiperespectrales en 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 píxeles de copa bien iluminados, descartando el resto tales como suelo, copa en sombra o tronco.

Sobre las imágenes filtradas se digitalizaron los pies de interés en cada vuelo y parcela para extraer los valores de reflectancia medios de la copa y su desviación típica para cada longitud de onda mediante software GIS.

De los valores espectrales extraídos se descartan las 20 primera y 20 últimas bandas debido a su alto nivel de ruido y a partir de los restantes se generan 53 índices espectrales de vegetación, obteniendo como resultado 285 variables predictivas. Esta información junto a la obtenida en laboratorio se introdujo en un script de diseño propio con objetivo el entrenamiento de un

modelo clasificador. Para ello se separó el 80% de la muestra que se empleó como entrenamiento y se reservó el 20% para su validación.

Adicionalmente, se compararon las firmas espectrales de los pies afectado y los no afectados para todos los casos.

Las parcelas de pino se volaron durante el periodo estival del año 2020 en 6 momentos temporales diferentes del periodo estival. Además, en el año 2022 se realizó un vuelo óptico sobre el área afectada por heterobasidion, con intención de comprobar el avance del patógeno.

Las parcelas de nogal se volaron en 2021 en 3 ocasiones durante el periodo estival, coincidiendo con los momentos de abonado y de mayor importancia para la producción del fruto. También se realizó un vuelo óptico sobre ellas para facilitar la localización de los pies objeto de estudio.

Las parcelas de dehesa se volaron en 2021 en dos momentos temporales diferentes del periodo estival. Además, se contaba con imágenes multiespectrales de la zona de los años 2020 y 2021, pertenecientes a otros proyectos diferentes, pero que aportaron información global del estado de la dehesa más allá de las parcelas hiperespectrales.

Tabla 1. Vuelos por zona de estudio

Zona	Vuelos hiperespectrales
<i>Pinus pinaster</i>	16-oct 2020
<i>Juglans regia</i>	1-Jul, 30-jul, 30-ago 2021
Dehesa mixta	09-jul, 03-sep, 04-nov 2021

Fuente: IGM-Zumain

2.4. Resultados

Tras aplicar la metodología descrita, se obtienen los siguientes resultados para las diferentes especies

2.4.1. Pino

En el año 2020 se localizó una parcela de *Pinus pinaster* en Alcorcillo con síntomas de afección fúngica tales como decaimiento generalizado y mortalidad en corros. De esta zona se seleccionaron dos pies con claros síntomas de afección. En las parcelas de Rábano de Aliste donde se observó también decaimiento de la masa se seleccionaron 4 pies adicionales.

De cada uno de los pies seleccionados se tomaron muestras de acículas, raíz y hoja, que se mandaron a laboratorio para la detección e identificación de hongos fitopatógenos mediante técnicas moleculares.

Los resultados confirman la afección de *heterobasidion annus* en la zona de Alcorcillo y desvelan la presencia de *Fusarium solani* en las parcelas de Rábano de Aliste.

Cuadro 1. Patógenos perjudiciales identificados en *Pinus pinaster*

Pie	Heterobasidion annosum	Fusarium solani
AL1	Positivo	Positivo
AL2	Positivo	Negativo
RA1	Negativo	Positivo
RA2	Negativo	Positivo
RA3	Negativo	Negativo
RA4	Negativo	Positivo

Fuente: IGM-Zumain

Sobre ambas parcelas se realizó un vuelo hiperespectral VNIR para capturar las firmas espectrales de todos los pies muestreados. Dichas firmas espectrales se compararon entre los distintos tipos de afecciones, obteniendo como resultado las gráficas de las Figuras 2 y 3.

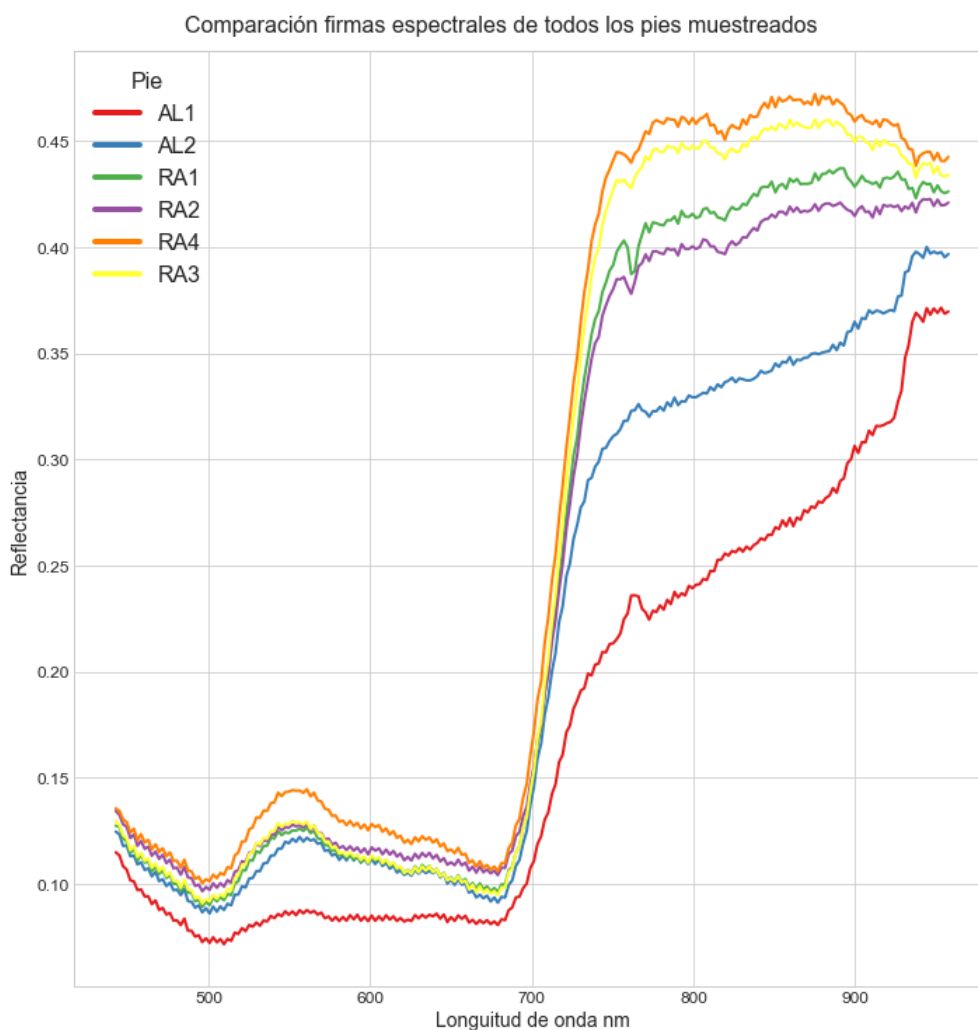


Figura 2. Firmas espectrales de los pies muestreados. (IGM-Zumain)

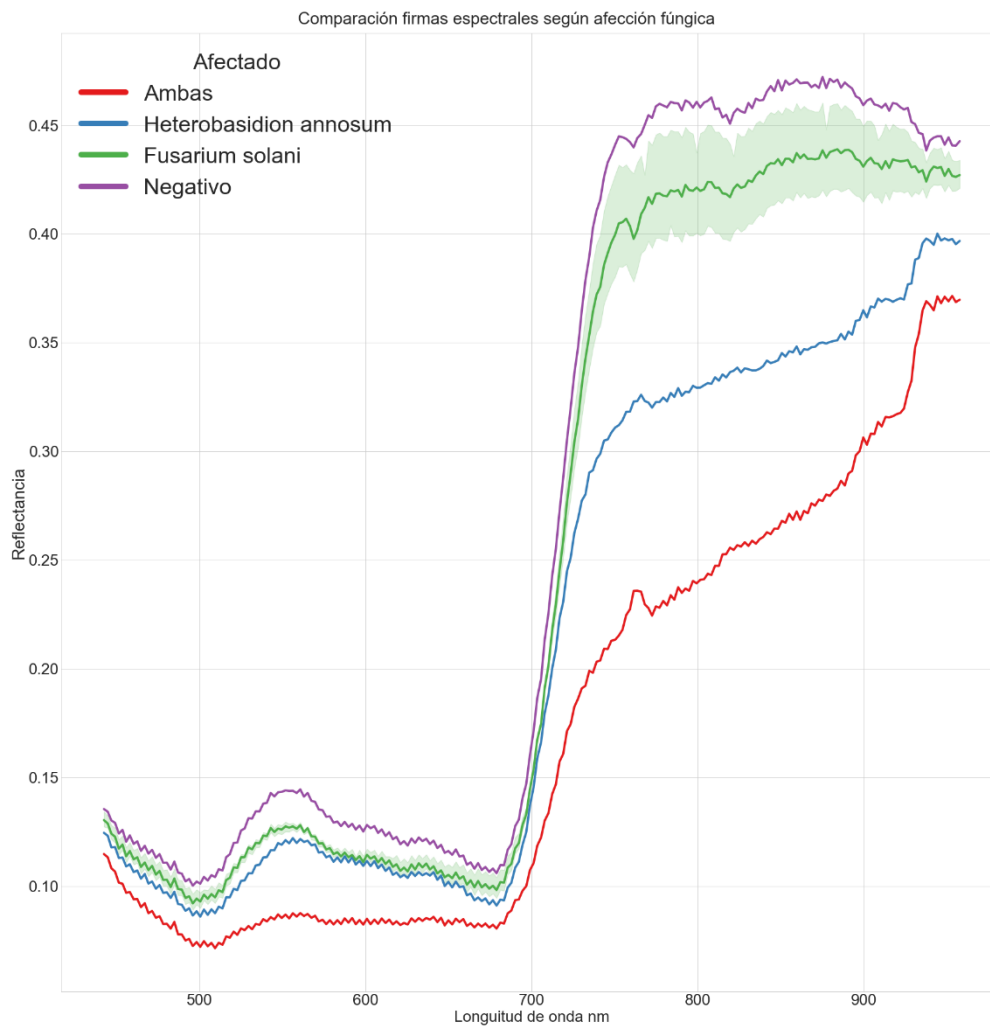


Figura 3. Firmas espectrales según afección. (IGM-Zumain)

En el año 2022 se realizó una nueva visita de campo en la zona de Alcorcillo, con objetivo de observar la evolución de la zona de estudio. En este caso se realizó un vuelo óptico de alta precisión, que permitiera identificar estado general de la masa.

Empleando técnicas de fotointerpretación sobre la ortofotografía obtenida a partir del vuelo óptico, se identificaron pies visiblemente de decaídos. Estos mismos pies se identificaron en el vuelo hiperespectral del año 2020 y se incluyó la información de toda la zona de estudio en un scrip para el entrenamiento de un modelo predictivo. Como resultado se obtuvo la clasificación de todos los pies en dos grupos.

En la siguiente figura se muestran las firmas espectrales de ambos grupos.

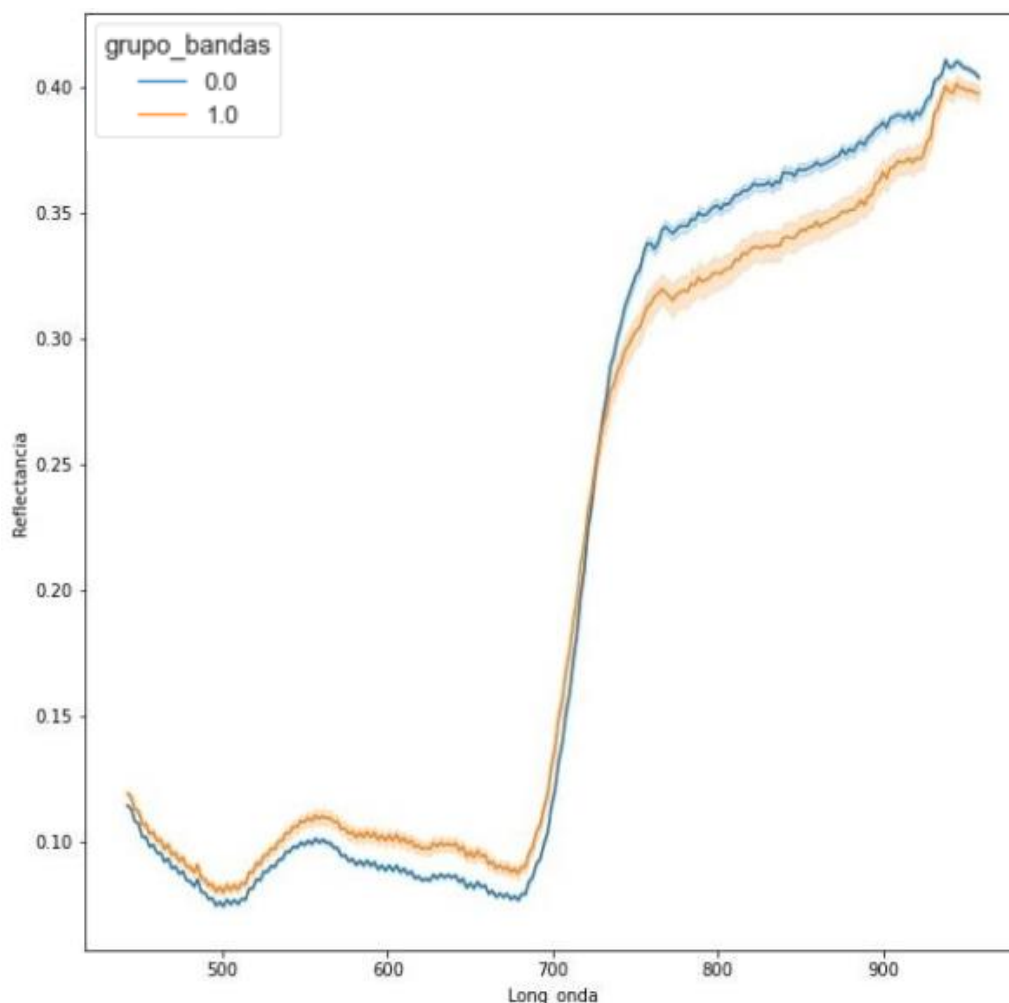


Figura 4. Firmas espectrales según grupos. (IGM-Zumain)

Posteriormente se realizó una visita de campo en la que se inventariaron todos los pies del grupo 1. Como resultado se obtuvo que de los 55 pies inventariados 11 se encontraban en buen estado aparente, 31 regulares y 12 en muy mal estado o muertos. Entre los síntomas del estado regular destacan la falta de hojas y presencia de ramas secas, mientras que los pies en mal estado se identifican por una defoliación severa y resinaciones en el tronco.

Además, todos los pies muertos en 2022 se encontraron dentro del grupo de predicción 1.

2.4.2. Nogal

Los análisis de laboratorio confirmaron la presencia de *Phytophthora* en la parcela. Del total de 77 muestras analizadas 31 de ellas dieron positivo y el resto negativo. Los análisis de suelo no mostraron anomalías en la composición o estructura.

Se puede observar grandes diferencias entre la firma hiperespectral de los pies afectados y los no afectados. Entendiendo como positivas aquellas que dieron positivo en laboratorio y como negativas las obtenidas a partir de otros pies situados lejos del foco de afección.

En las longitudes de onda del azul (435-500) y rojo (618-780) la firma prácticamente se solapa. En la franja del verde (497-570) la firma de los pies no afectados alcanza una reflectancia ligeramente superior pero la mayor diferencia se sitúa en el rango del infrarrojo, a partir de los 780nm. Además, en este rango la desviación estándar de las firmas no se solapa, existiendo gran distancia espectral entre ellas.

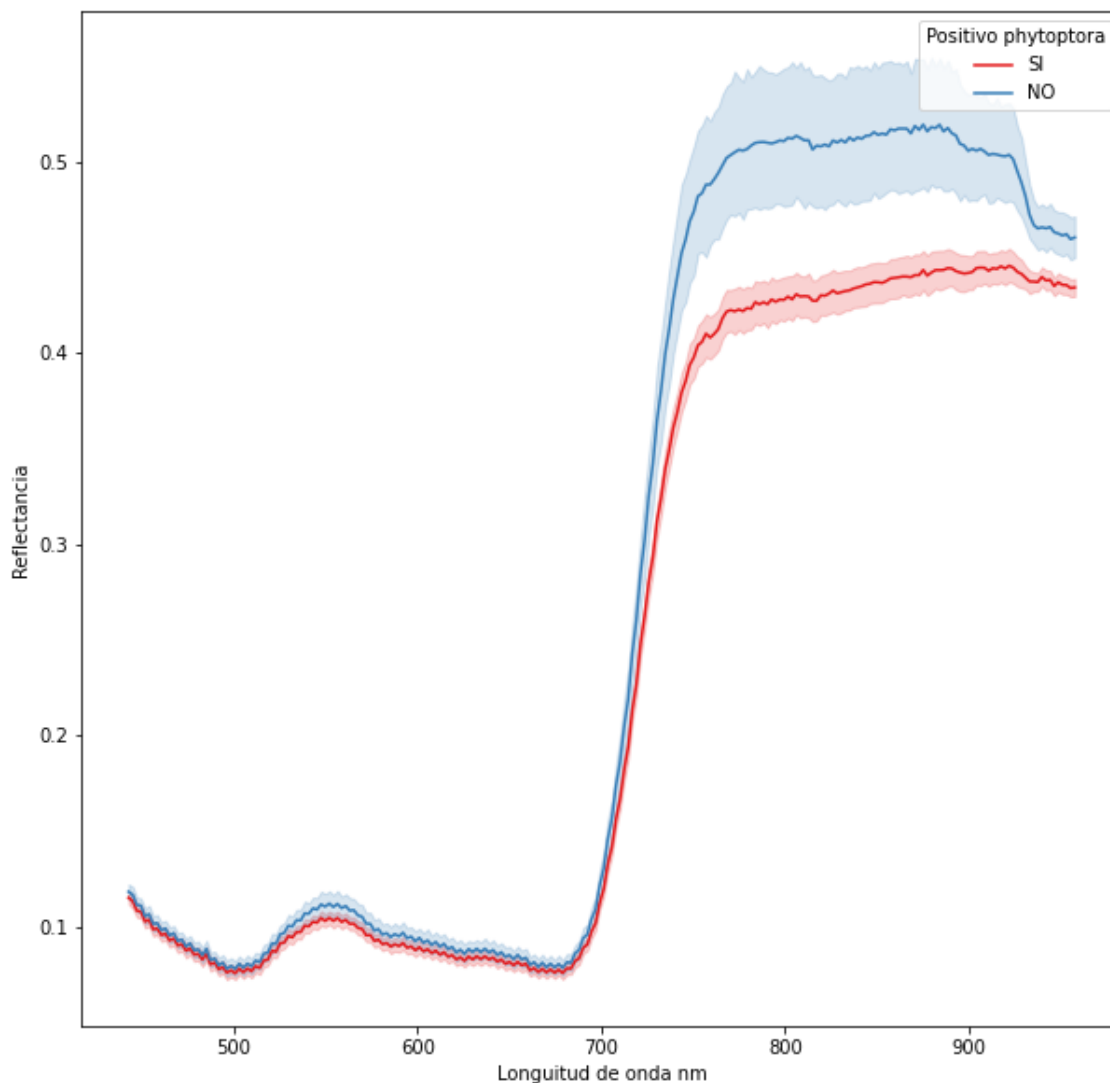


Figura 5. Firmas espectrales de pies positivos y negativos en Phytophthora. (IGM-Zumain)

El entramiento del modelo clasificador arrojó una matriz de confusión con una precisión del 0.79 para no afectados y 0.88 para afectados en los datos de validación, con una exactitud final de 0.81.

Tabla 2. Resultados de entrenamiento y validación del modelo de predicción

Entrenamiento				Validación			
Predicho		Observado		Predicho		Observado	
		No afect.	Afectado			No afect.	Afectado
No afect.	No afect.	27	10	No afect.	No afect.	15	1
	Afectado	8	34		Afectado	Afectado	4
Precisión		0.77	0.77	Precisión		0.79	0.88
Exhaustividad		0.73	0.81	Exhaustividad		0.94	0.64
F1		0.75	0.79	F1		0.86	0.74
Exactitud		0.77		Exactitud		0.81	

Fuente: IGM-Zumain

El modelo resultante se utilizó para clasificar todos los pies de la parcela de estudio en afectados y no afectados.

Para valorar los resultados se tuvieron en cuenta únicamente los positivos en Phytophthora, esto se debe a que el aislamiento de Phytophthora en laboratorio presenta grandes dificultades, en especial en muestras de suelo debido al bajo nivel de propágulos, mientras que los positivos no guardan incertidumbre. Para esta comparación se tuvieron en cuenta las 3 metodologías de detección testadas: análisis visual, teledetección espectral y análisis de laboratorio como validación.

Para la evaluación visual, de los 31 pies positivos en laboratorio 14 coincidieron con los establecidos como afectados mediante el análisis visual. Por otra parte, la coincidencia con la predicción mediante teledetección fue de 27.

Tabla 3. Comparación de pies catalogados como positivos según método de evaluación

Nº pies positivos en Phytophthora		
Totales positivos en laboratorio	Coincidentes con evaluación visual	Coincidentes con teledetección
31	14	27

Fuente: IGM-Zumain

2.4.3. Dehesa

En el caso de la dehesa mixta el estudio se centró sobre la sabina al tratarse de una de las especies predominantes y con un mayor grado de decaimiento aparente.

En este entorno las pruebas de laboratorio no mostraron la presencia de ningún patógeno perjudicial en las muestras recogidas siendo un total de 60 muestras entre suelo, raíz y tronco. Sin embargo, los análisis de suelo muestran una deficiencia de fósforo generalizada en todo el monte.

En la evaluación visual si se aprecia una diferenciación de estados entre la vegetación, pudiendo determinar 3 estados aparentes independientemente del agente causante de la afección:

bueno, regular, malo y malo por efecto de la sequía. Se establece una quinta categoría 'Sano' siendo pies que teniendo el mismo aspecto que los de estado bueno, se encuentran localizados en una dehesa cercana cuyo estado de salud generalizado se identifica como bueno por los técnicos del monte.

Entendemos por regular un estado ligeramente deteriorado, en general con una densidad foliar reducida y una falta de vivacidad en el color de las hojas. Los síntomas predominantes de un estado malo son una densidad foliar más reducida y la presencia de exudados en el tronco. En algunos también es destacable la presencia de cerambícidos.

Para el análisis se comparan las firmas espectrales medias de los pies según las categorías identificadas en la evaluación visual, al no haber obtenido resultados diferenciadores tras el análisis de las muestras en laboratorio.

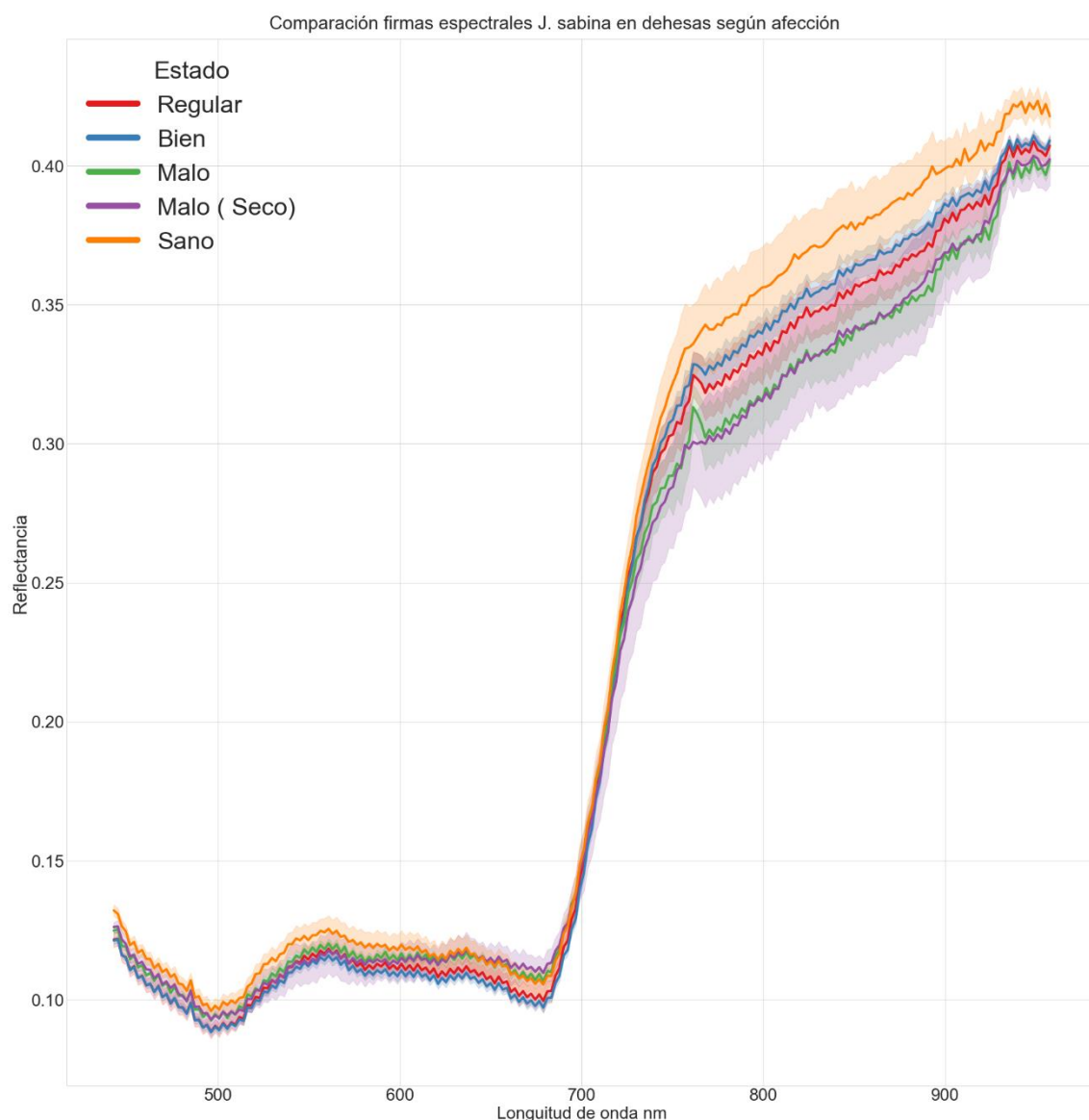


Figura 6. Firmas espectrales de sabina según estado visual. (IGM-Zumain)

2.5. Discusión

Las plantas sanas absorben la mayor parte de la luz visible puesto que esta es empleada en la realización de la fotosíntesis. Los principales pigmentos que absorben en esta región son las clorofilas, los ficobilisomas y los carotenos []. En este rango la reflexión tiene lugar principalmente en la región del verde, responsable del color verdoso de las hojas.

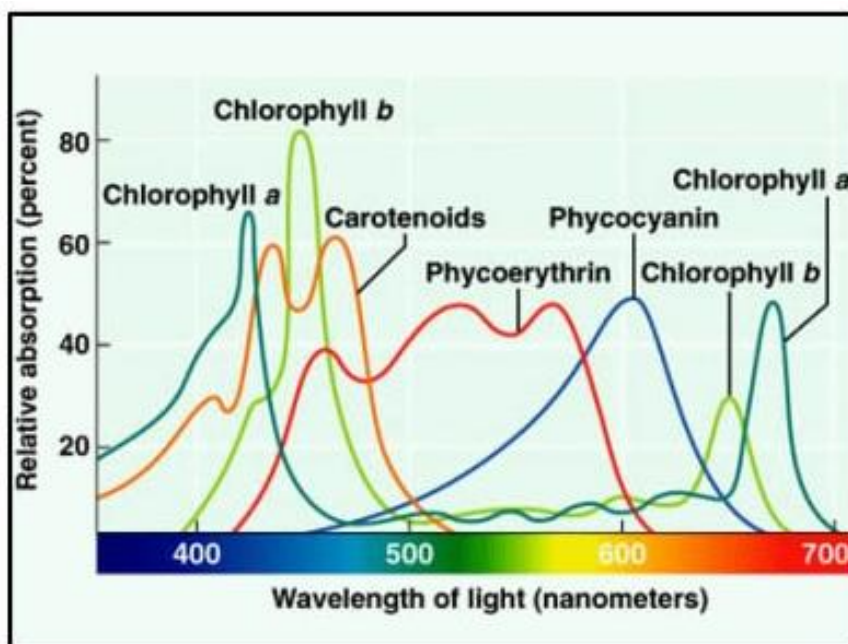


Figura 7. Absorción relativa. (ARSET. NASA)

La región del infrarrojo cercano (NIR) se extiende a partir de los 780nm y está asociada con la radiación térmica. La vegetación refleja en esta región. Se considera altamente nociva una alta absorción, ya que podría desembocar en el sobrecalentamiento de la hoja. Se relaciona con la estructura interna de la hoja.

En general, la vegetación sana muestra una alta absorción en la región del visible, con un pico en la región del verde, y una alta reflexión en la región del infrarrojo cercano. Cuanto más grande sea la relación existente entre la región del NIR y la región del rojo, mayor será el vigor vegetal de la planta. Esto suele cuantificarse mediante el índice espectral mundialmente conocido NDVI.

Volviendo a los datos del estudio, pasamos a observar las firmas espectrales de las zonas estudiadas.

En el caso de estudio del **pino**, En las figuras 2 y 3 se comparan las firmas espectrales de los pies analizados en laboratorio. Se puede observar como el pie AL1, afectado por heterobasidion y fusarium simultáneamente, muestra una mayor absorción en el NIR, pero carece del pico verde en la región visible. El siguiente pie, AL2, solo afectado por heterobasidion, muestra una forma muy similar a los pies AR en la región del visible, pero una absorción alta en la región del NIR. Ambos pies carecen de la meseta por la vegetación sana en la región del NIR.

Los pies RA1 y RA2, afectados únicamente por fusarium muestran comportamientos muy parecidos en ambas regiones, mientras que RA4, teniendo la misma afección, cuenta con valores de reflectancia más altos.

Por último, RA3, que ha dado negativo en ambos patógenos, muestra unos valores en el rango del visible muy parecidos a RA1, RA2 y AL2, mientras que, en el rango del infrarrojo las similitudes con mayores con RA4. Considerando como sano el comportamiento espectral del pie que ha dado negativo en ambos patógenos, podemos decir que todos los pies afectados muestran comportamientos espectrales diferentes al pie de validación. Dentro de estos comportamientos espectrales anómalos, identificamos cuatro variaciones: ausencia de la meseta característica en la región del NIR, absorción elevada en la región del NIR, ausencia del pico característico en la región del verde y reflectancia elevada en la región del visible.

Los diferentes comportamientos espectrales podrían estar indicándonos, no solo el tipo de afección que padece el pie estudiado, si no también el tipo de comportamiento o avance de la afección, dato que los análisis de laboratorio no han podido mostrarnos.

Observando las Ilustraciones XX, correspondiente a todos los pies pertenecientes a la zona de Alcorcillo, podemos comprobar espectrales pertenecientes a los grupos 0 y 1 se diferencian entre ellas con facilidad, mostrando el grupo 1 una absorción mayor en el verde y en el NIR, zonas donde la reflectancia debería ser mayor. Esto nos indica un menor vigor en los pies pertenecientes al grupo 1.

Para el caso del **nogal**, las firmas espectrales de la Figura X muestran un comportamiento muy similar en el rango del visible, pero una diferenciación notable en la región del NIR, siendo los pies afectados por Phytophthora los que tienen valores de reflectancia más bajos en esta región.

El modelo predictivo arroja resultados muy prometedores con un 81% de exactitud en las muestras de validación. Además, la coincidencia de las técnicas de teledetección con los positivos totales en laboratorio es del 87% mientras que mediante la evaluación visual es solo del 45%.

Es importante resaltar que la Phytophthora es difícil de detectar, siendo habitual tener como resultado de los análisis de laboratorio falsos positivos, lo que dificulta la obtención de más información con la que alimentar el modelo. Adicionalmente, en este caso nos encontramos en una plantación con riego, lo que facilita la localización de síntomas visibles y la recogida de muestras. Estas tareas serían mucho más laboriosas de realizar en un monte.

En el último caso de estudio, la **dehesa mixta**, podemos observar que las sabinas con un estado malo tienen un comportamiento espectral similar, diferenciándose en el pico de absorción del rojo y en un pico adicional entre el límite de las regiones óptica y NIR, entorno a los 780nm. A pesar de ello, ambas desviaciones estándar están muy solapadas entre sí.

Para los estados bien y regular encontramos también un comportamiento similar, aunque los pies en buen estado tienen valores de reflectancia algo más altos en la región del NIR. Encontramos también un ligero solape entre las desviaciones estándar de ambas categorías.

Por último, el estado sano destaca, mostrando valores de reflectancia más altos que el resto tanto en el pico del verde como en la región del NIR.

Aunque no se han detectado patógenos perjudiciales a través de los análisis realizados en laboratorio, la carencia de fósforo no parece causa suficiente como para producir un decaimiento de tales magnitudes. Esta misma casuística se da en otras dehesas situadas en la comunidad de Madrid, donde a pesar de notar un decaimiento generalizado no se ha encontrado un origen biótico []. No obstante, esta situación podría desencadenar en la incursión de múltiples agentes perjudiciales oportunistas, ocasionando un rápido declive.

Podemos decir que en general y para todas las zonas estudiadas, los pies con peor vigor, afectados por un patógeno perjudicial o con más síntomas de afección, muestran una firma espectral en la que los valores de reflectancia en la región del NIR con menores que los de sus coetáneos de la misma región y especie.

Además, los modelos predictivos entrenados a partir de la diferenciación realizada a través de las firmas espectrales se han mostrado precisos a la escala del proyecto.

2.6. Conclusiones

En términos generales, concluimos que **la detección hiperespectral ha demostrado ser una potente herramienta para su aplicación en la detección temprana de plagas en entornos complejos.**

Durante el desarrollo del proyecto se han obtenido muestras de la utilidad del análisis de la firma hiperespectral de los pies afectados por diversos estados perjudiciales, e indicios de la capacidad para identificar diferentes tipos y niveles de afección.

Se considera necesario validar la metodología descrita en futuras investigaciones, aumentando el número de muestras realizadas por parcela y las visitas a campo en periodos medios y largos de tiempo que permitan observar y confirmar la evolución de la masa estudiada.

La puesta a punto de este sistema podría concluir en el desarrollo de una herramienta de enorme utilidad para la localización de rodales debilitados, focos de afección y otros problemas asociados. **Todo ello permitiría destinar esfuerzos de prevención, corrección y gestión donde más se necesitan, siendo un elemento clave para la sostenibilidad de los montes en el escenario climático actual y futuro.**

3. BIBLIOGRAFÍA

[1] Naciones Unidas (1992). Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. FCCC/INFORMAL/84

[2] Bock, W. J. (1980). The definition and recognition of biological adaptation. *American Zoologist*, 20(1), 217-227.

[3] NASA (2021). Global Temperature. Global Climate Change, Vital Signs of the Planet. <https://climate.nasa.gov>. Última visita: septiembre 2022

[4] IPCC, 2018: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, H.-O. Pörtner, D. Roberts, J. Skea, P.R. Shukla, A. Pirani, W. Moufouma-Okia, C. Péan, R. Pidcock, S. Connors, J.B.R. Matthews, Y. Chen, X. Zhou, M.I. Gomis, E. Lonnoy, T. Maycock, M. Tignor, and T. Waterfield (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 616 pp. [https://doi.org/ 10.1017/9781009157940](https://doi.org/10.1017/9781009157940).

[5] Jean McCullum, A., Torres Pérez, J., Bengtsson, Z. (2021). Datos hiperespectrales para sistemas terrestres y costeros. NASA's Applied Remote Sensing Training Program. Part3.