Universidad de Valladolid

Escuela de Ingeniería de la Industria Forestal, Agronómica y de la Energía

Campus de Soria

GRADO EN INGENIERÍA FORESTAL: INDUSTRIAS FORESTALES

TRABAJO FIN DE GRADO

TITULO: Reconstrucción de las infestaciones por procesionaria mediante técnicas de teledetección

~~~~~~~

AUTOR: ADRIAN CARPINTERO BLASCO

DEPARTAMENTO: CIENCIAS AGROFORESTALES

TUTOR/ES: DARÍO DOMINGO RUIZ Y

CRISTINA GÓMEZ ALMARAZ

SORIA, JULIO DE 2024
~~~~~~~

AUTORIZACIÓN del TUTOR del TRABAJO FIN DE GRADO

D. Darío Domingo Ruiz contratado posdoctoral del departamento de Ciencias Agroforestales y Dª. Cristina Gómez Almaraz profesora del departamento de Ciencias Agroforestales, como Tutores del TFG titulado:

Reconstrucción de las infestaciones por procesionaria mediante técnicas de teledetección.

presentado por el alumno D. Adrián Carpintero Blasco dad el Vº. Bº. y autorizad la presentación del mismo, considerando que cumple con los requisitos necesarios para su entrega y defensa ante el Tribunal de evaluación asignado.

Soria, 12 de julio de 2024

Los Tutores del TFG,

Fdo.: D. Darío Domingo Ruiz Fdo: Dª. Cristina Gómez Almaraz

RESUMEN del TABAJO FIN DE GRADO

TÍTULO: Reconstrucción de las infestaciones por procesionaria mediante técnicas de teledetección

DEPARTAMENTO: Ciencias Agroforestales.

TUTOR(ES): Darío Domingo Ruiz y Cristina Gómez Almaraz.

AUTOR: Adrián Carpintero Blasco

RESUMEN:

En el presente Trabajo Fin de Grado se ha evaluado la capacidad de la teledetección para detectar la defoliación producida por la procesionaria en los pinares de Castilla y León, provincias de Soria, Burgos, Segovia y Valladolid entre los años 2002 y 2020. El objetivo central de esta investigación es evaluar el uso de información multiespectral del satélite Landsat para la detección y seguimiento de la defoliación causada por procesionaria, pudiendo ser de utilidad para la gestión forestal a la hora de planificar medidas de control y prevención ante este defoliador.

Para realizar esta investigación se han seleccionado 53 parcelas pertenecientes a la Red de Seguimiento de Daños en los Bosques de Castilla y León dominadas por *Pinus nigra, Pinus Sylvestris, Pinus pinaster y Pinus pinea* y cuyo principal agente defoliador ha sido la procesionaria. Se han descargado y procesado las imágenes Landsat entre los años 2002 y 2020 calculando los índices de vegetación NDVI, NBR, MSI y RVI. En base a los índices espectrales se han propuesto tres escenarios asociados con cambios espectrales entre periodos temporales previos o posteriores a la defoliación, es decir, entre los meses de primavera y otoño. En el primer escenario se ha calculado la diferencia entre la primavera del año biológico en curso y el otoño del año biológico en curso, para el segundo se ha realizado la diferencia entre la primavera del año biológico en curso y la primavera del año anterior. En el tercer escenario hemos calculado la diferencia normalizada entre la primavera del año biológico y el otoño del año biológico en curso con respecto al valor del otoño del año biológico en curso. Posteriormente se ha realizado un análisis estadístico para determinar si los índices espectrales para los tres escenarios son útiles para distinguir tres clases de defoliación: defoliación baja (< 20%), media (20-40%) y alta (>40%). Para ello se han utilizado análisis de la varianza para muestras normales (ANOVA) y, en caso de no ser normales, tests no paramétricos como el test de Kruskall Wallis y el posthoc test de Dunn con objeto de determinar si existen diferencias estadísticamente significativas entre clases de defoliación.

Los resultados obtenidos nos han mostrado que los valores de defoliación media varían entre el 24% para el caso de *P.sylvestris* hasta 26% para el caso del *P. pinaster*. Los índices de vegetación NDVI y NBR calculados según el primer escenario son eficaces para distinguir entre las tres clases de defoliación según muestra el test de Kruskal Wallis, mostrando diferencias estadísticamente significativas entre las las clases baja y media o baja y alta según el test de Dunn. La implementación de técnicas de teledetección permite el seguimiento a gran escala y a largo plazo de los procesos de defoliación por procesionaria en masas de pinar ofreciendo información de interés para la gestión de las masas forestales.

Contenido

1. INTRODUCCIÓN 6
1.Introducción 5
1.1 Justificación 5
1.2 Especie analizada: *Thaumetopoea pityocampa* 6
1.2.1 Descripción general 6
1.2.2 Descripción de las fases de desarrollo 7
1.2.3 Ciclo Biológico 10
1.2.4 Influencia del clima sobre el insecto 11
1.2.5 Umbrales de desarrollo y actividad: 12
1.2.6 Umbrales letales 12
1.2.7 Daños 13
1.2.8 Distribución 13
1.2.9 Metodos de control 14
2. OBJETIVOS 16
2.OBJETIVOS 17
2.1 Objetivo General 17
2.2 Objetivos específicos 17
3. METODOLOGÍA 18
3.1 Área de estudio 18
3.2 Descarga de datos Landsat 20
3.3 Cálculo de índices espectrales 22
3.3.1 NDVI 22
3.3.2 NBR 23
3.3.3 MSI 25
3.3.4 RVI 26
3.4 Cálculo de diferencias espectrales entre momentos de interés: otoño y primavera 28
3.5 Extracción de estadísticas por parcela 28
3.5.1 Selección de parcelas 28
3.5.2 Buffer de las parcelas seleccionadas 29
3.5.3 Generación del Stack (combinar) 30
3.5.4 Estadísticas zonales por parcela 30
3.6. Análisis estadístico 31
3.6.1 Histogramas de valores de defoliación por especies 31

3.6.2 Categorización en clases de defoliación 32
3.6.3 Análisis de varianza 32
3.6.4 Test de Shapiro Wilk 32
3.6.5 Transformar a logaritmo 33
3.6.6 Transformación a raíz 33
3.6.7 Histogramas de las variables Landsat 34
3.6.8 Prueba de Kruskall Wallis 34
3.6.9 Test de Dunn 34
3.6.10 Gráficas de las variables seleccionadas en Kruskall Wallis 34
3.7 Cartografía 35
4.RESULTADOS 37
4.1 Determinación de las clases de defoliación en base a los histogramas de defoliación por especie 37
4.2 Análisis de normalidad de las variables Landsat a partir de los histogramas y el test de Shapiro Wilk 42
4.3 Diferencias de las variables de Kruskall Wallis 46
4.4 Interpretación de los resultados del test de Dunn 46
4.5 Interpretación del diagrama de caja y bigotes 47
5.DISCUSIÓN 50
6.CONCLUSIONES 52
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 53
8. PLANOS 57

1. INTRODUCCIÓN

1.Introducción

1.1 Justificación

La aparición de la procesionaria del pino en los bosques y plantaciones de pino mediterráneo es cada vez más preocupante, ya que procesos como el calentamiento global y la expansión de masas homogéneas de pinar han amplificado la frecuencia y virulencia de los brotes.

La procesionaria (*Thaumetopoea pityocampa*), es uno de los insectos defoliadores más importantes del área mediterránea, cuyas orugas se alimentan de las hojas de diferentes especies de Pinus y Cedrus, provocando, en ocasiones, brotes relevantes. Aunque los pinos rara vez mueren y los árboles afectados muestran una notable capacidad para superar la reducción del crecimiento inducida por la defoliación de las orugas, los brotes se consideran un problema en los bosques y plantaciones, especialmente para servicios como la producción de madera o el secuestro de carbono o (Kurz et al., 2008; Seidl et al., 2014). Además de los daños directos a la vegetación, la procesionaria también puede representar un riesgo para la salud humana y animal debido a la presencia de sus pelos urticantes, pudiendo causar reacciones alérgicas y problemas respiratorios, que cada vez son más comunes.

Para llevar a cabo una gestión efectiva de la defoliación por procesionaria debemos comprender la gravedad y distribución de las infestaciones. Sin embargo, la detección precisa y oportuna de la defoliación en áreas forestales extensas puede suponer un desafío, especialmente en zonas de difícil acceso o con una cobertura vegetal densa.

En este contexto, los datos de teledetección proporcionan información relevante que puede ser de interés para generar herramientas para la detección y monitorización de la defoliación de la procesionaria del pino. La teledetección consiste en la adquisición y análisis de datos remotos, como imágenes de satélite o fotografías aéreas. Ofrece la capacidad de obtener información detallada y actualizada sobre la distribución espacial y temporal de la defoliación en áreas forestales extensas. Esta información puede ser de gran relevancia para la toma de decisiones en la gestión forestal, permitiendo una respuesta rápida y eficaz ante brotes de infestación.

El objetivo de este Trabajo Fin de Grado es evaluar el uso de información multiespectral del satélite Landsat para la detección y seguimiento de la defoliación causada por la procesionaria en los pinares de Castilla y León, a través de diferentes índices espectrales (NDVI, NBR, RVI y MSI). El fin último es determinar si es posible identificar y evaluar las diferentes áreas afectadas por este patógeno a lo largo del tiempo utilizando técnicas de teledetección.

A lo largo de este trabajo, se abordarán diferentes aspectos relacionados con la defoliación por procesionaria, incluyendo su impacto en ecosistemas forestales, los métodos y técnicas de teledetección empleados en la detección y monitorización, con sus respectivos análisis y conclusiones.

1.2 Especie analizada: *Thaumetopoea pityocampa*

1.2.1 Descripción general

La procesionaria (*Thaumetopoea pityocampa*) es un oligofago univoltino de coníferas. Sus principales anfitriones son *Pinus spp*., pero también puede atacar a *Cedrus spp*. y el introducido *Pseudotsuga menziesii* (Roques et al., 2002). La fenología de la especie varía según las condiciones climáticas (Demolin et al., 1969). En la mayor parte de su área de distribución, *T. pityocampa* vive en zonas de clima mediterráneo, caracterizado por veranos calurosos y secos. La especie evita las altas temperaturas de verano mediante un período de pupa más largo, posponiendo así la aparición de adultos hasta finales del verano cuando las condiciones para el desarrollo de huevos y larvas son más favorables en climas más continentales. Por otro lado, el periodo pupal (estivación) es más corto. Esta adaptación le permite tener el tiempo suficiente para el desarrollo larval y construir nidos antes de que las temperaturas bajen al punto de congelación.

Las larvas son gregarias y se desarrollan dentro de un nido de seda, que normalmente construyen sobre una rama o copa de un árbol para maximizar la exposición al sol. Las larvas se alimentan nocturnamente de las acículas durante todo el invierno, siempre que la temperatura nocturna sea superior a 0ºC (Huchon y Demolin 1971). A finales del invierno o comienzos de la primavera las larvas forman una procesión y se mueven para pupar en el suelo. Una proporción variable de la colonia entra en una diapausa prolongada, que puede tener una duración variable, de hasta seis años según Demolin (1969), pero que puede variar según las zonas y todavía requiere de más investigación. La aparición de los adultos es seguida inmediatamente por el apareamiento y la puesta de huevos.

Las orugas pasan por hasta cinco estadios de desarrollo durante el periodo invernal. Pueden reducir el crecimiento de los árboles mediante una defoliación parcial o completa (Laurent-Hervouet 1986), y en las últimas fases de desarrollo desarrollan pelos urticantes de defensa lo que puede generar un riesgo para la salud pública causando reacciones alérgicas como por ejemplo dermatitis de contacto (Lamy 1990). Debido a su importancia ambiental y para la salud, las poblaciones de *T. pityocampa* han sido monitoreadas durante muchos años, mediante censos de nidos invernales y trampas con feromonas, como parte de los programas de gestión de plagas en toda la región del Mediterráneo. La fácil detección de los nidos permite la recopilación de datos precisos sobre la distribución y la abundancia incluso con bajas densidades de población (Geri y Millier 1983).

Taxonómicamente, la procesionaria se clasifica de la siguiente forma:

Reino: *Animalia*

- Filo: *Arthropoda*

- Clase: *Insecta*

- Orden: *Lepidoptera*

- Familia: *Thaumetopoidae*

- Género: *Thaumetopoea*

- Especie: *Thaumetopoea Pityocampa*

1.2.2 Descripción de las fases de desarrollo

Imago (adulto/mariposa): La hembra, con en torno a 36-49 mm de envergadura, es ligeramente más grande que el macho (Figuras 1 y 2). Las antenas son pectinadas, aunque aparentemente filiformes. El tórax se encuentra cubierto de pelos grisáceos, que en las zonas más cálidas se vuelven más pálidos. El abdomen es cilíndrico y grueso y está recubierto por unas escamas doradas que la hembra va colocando sobre la puesta para protegerla. Las alas anteriores tienen una coloración grisácea, con unas bandas transversales difusas más oscuras. Las alas posteriores son blanquecinas, con una mancha oscura en la zona anal. El macho es de menor tamaño (31-39 mm de envergadura) y más estilizado que la hembra. Tiene las antenas claramente pectinadas y el tórax es densamente piloso, con coloración grisácea. El abdomen es más delgado que en la hembra y ligeramente apuntado en su parte posterior, donde presenta un penacho de pelos de color marrón claro. Las alas anteriores son de color grisáceo, con intensidad variable, con tres franjas transversales más oscuras. Las alas posteriores son blanquecinas, con la parte más próxima al cuerpo muy pelosa.

Figura 1. Macho adulto de procesionaria. Fuente: Lepiforum (Fotos: Egbert Friedrich)

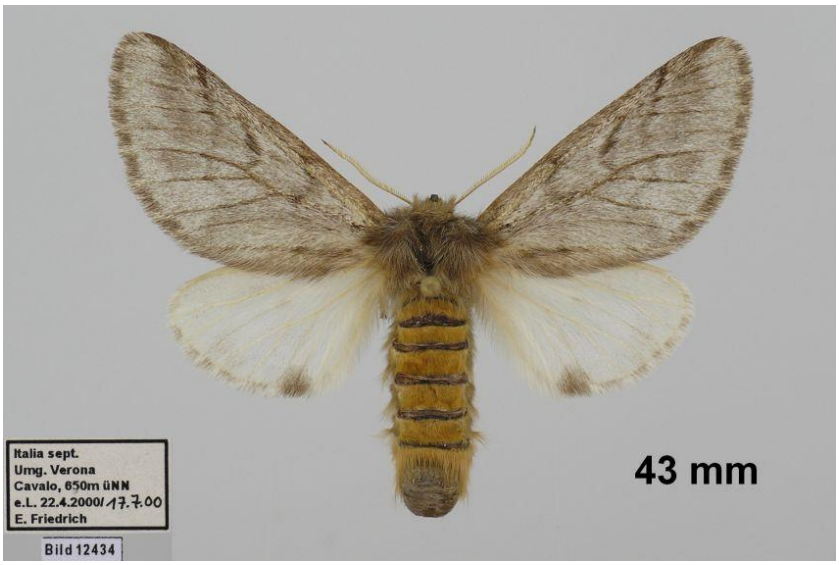


Figura 2. Hembra adulta de procesionaria. Fuente: Lepiforum (Fotos: Egbert Friedrich)

Puesta: La hembra sitúa la puesta envolviendo dos acículas de una misma vaina, posteriormente la cubre con las escamas doradas de su abdomen. Los huevos son esféricos de color blanquecino y duros, fácilmente observables si se quitan las escamas que recubren la puesta. La puesta se coloca helicoidalmente sobre las acículas formando al final unas filas de huevos (Figura 3).

Figura 3. Puesta de procesionaria. Fuente: Junta de Andalucía

Oruga: la oruga experimenta desde su nacimiento cuatro mudas, pasando por cinco estadios larvarios. Recién emergida del huevo mide unos 3 mm y presenta un color gris-verdoso, tras la cuarta muda, durante el quinto estadio alcanza un tamaño de entre 25 y 40 mm. A partir del tercer estadio adquieren el aspecto característico: pelosas, de coloración parda, con los pelos blanquecinos y es a partir de este estadio cuando comienzan a desarrollan los pelos urticantes que las hacen molestas pudiendo causar graves problemas de salud (Figura 4). Estos pelillos son lanzados al aire

cuando algo las molesta o perturba. En el quinto estadio, una vez que han completado su crecimiento comienzan a buscar un lugar para enterrarse y posteriormente crisalidar, transformándose en mariposa. Las orugas se trasladan de un árbol a otro para alimentarse formando las procesiones. De todas ellas la procesión de enterramiento es la más contemplada, ya que las demás suelen tener lugar durante la noche.

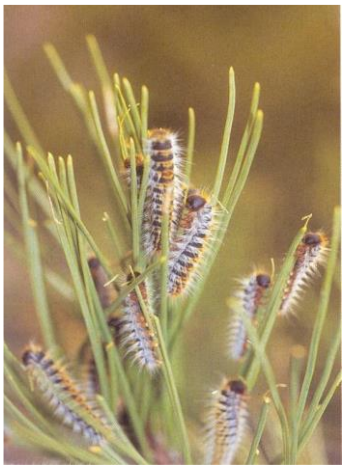


Figura 4. Orugas de procesionaria alimentándose de las acículas de pino.

Crisálida: cuando la oruga se entierra teje un capullo de seda (Figura 5) que es extremadamente urticante. La crisálida está en el interior y tiene forma ovoide castaño rojizo, de unos 20 mm de longitud, siendo las de las hembras más grandes (Figura 6). La crisálida puede permanecer en este estado entre un mes y varios años, siendo el motivo por el que es tan difícil controlar el llamado periodo de diapausa. El desarrollo de la crisálida presenta tres fases, una primera de intensa división celular, etapa de diapausa y formación del insecto adulto.

Figura 5. Capullo sedoso. Fuente: Junta de Andalucía

Figura 6. Crisálidas sin el capullo de protección. Fuente: Junta de Andalucía

1.2.3 Ciclo Biológico

La procesionaria presenta en general un ciclo anual que puede alargarse por la diapausa embrionaria varios años. Los adultos emergen bajo tierra en verano, comenzando en las zonas frías en mediados de junio hasta el final de agosto, mientras que en zonas cálidas ocurre entre finales de junio y mediados de octubre.

El nacimiento de los adultos, su apareamiento y la puesta de los huevos transcurre en un plazo no superior a dos días en los que el adulto no se alimenta. La puesta se realiza sobre árboles sanos y con buena insolación. La hembra coloca la puesta alrededor de una o dos acículas, incluyendo entre 50 y 300 huevos mientras los cubre con escamas que posee en el abdomen, quedando totalmente protegidos. La puesta tarda en eclosionar entre 30 y 40 días.

Las orugas se alimentan durante el otoño, el invierno e incluso parte de la primavera en las zonas más frías y su desarrollo está claramente ligado a las características climáticas. Las orugas nacen durante el otoño y formarán bolsones que van a servir como refugio y protección para las larvas, ya que en su interior están resguardadas de depredadores, parásitos y condiciones climáticas adversas, como la lluvia, el viento y la luz solar directa, siendo de vital importancia ya que las larvas son bastante vulnerables. Además de servir de refugio, el bolsón actúa como un microclima que ayuda a regular la temperatura interna. Durante el día, el bolsón retiene el calor, creando un ambiente más cálido que favorece el desarrollo de las larvas. Por la noche, el bolsón ofrece protección contra el frío, ayudando a mantener una temperatura adecuada para el descanso y la actividad metabólica de las larvas. En resumen, el bolsón de la procesionaria proporciona refugio, protección, termorregulación y facilita el comportamiento y comunicación de las larvas durante su ciclo de vida, contribuyendo al éxito reproductivo y supervivencia de la especie. Tiene lugar durante los últimos estadios larvarios.

Al final del invierno, bajan de las ramas en procesión, siendo guiadas por una oruga hembra. Una vez bajo tierra tejen un capullo acartonado individual y pasan enterradas entre dos meses y un periodo variable de varios años, de ahí la complejidad de predecir los brotes.

Durante la fase de crisálida ocurre el fenómeno de diapausa embrionaria, que consiste en un aletargamiento de las crisálidas. Algunas de estas se transformarán en mariposa incluso varios años más tarde. La fase larvaria en el caso más favorable puede durar unos 110 días, unos 3 meses y medio (Figura 7). En el caso más desfavorable puede durar el doble e incluso puede precisar más de un año para completar su ciclo biológico entero.

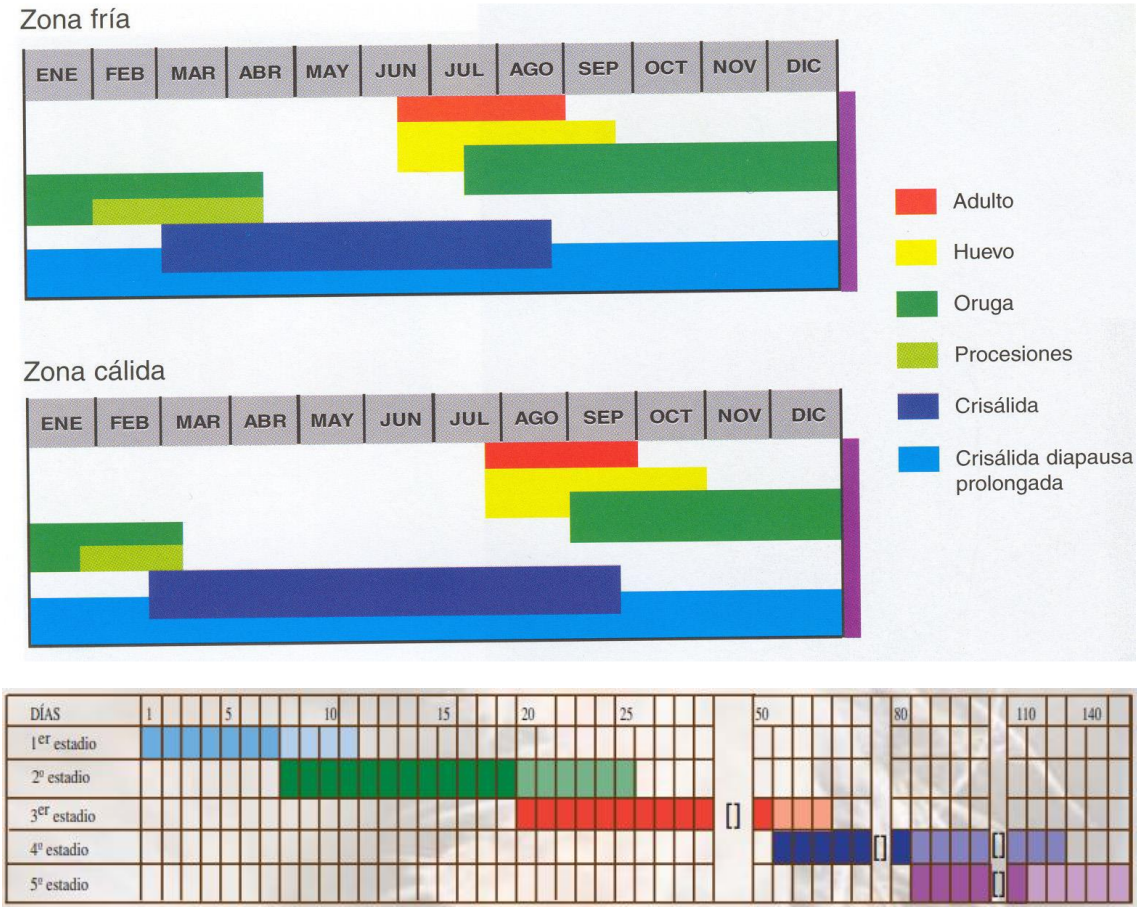


Figura 7. Duración de los estadios durante la fase de larva. Fuente: Consejería de medioambiente Junta de Andalucía

1.2.4 Influencia del clima sobre el insecto

La temperatura es un factor ambiental determinante que influye en varios aspectos del ciclo de vida y la actividad de la procesionaria. Las variaciones de temperatura tienen efectos significativos en la biología y ecología de este defoliador. Por ejemplo, unas temperaturas cálidas pueden acelerar el desarrollo de las larvas, promover la emergencia de los imagos y aumentar su actividad, mientras que con las temperaturas

frías ocurre todo lo contrario, ralentizando todos estos procesos, incluso poniendo en riesgo la supervivencia de esta plaga.

Debido al cambio climático, los inviernos cada vez son más cálidos, permitiendo que la procesionaria se expanda hacia el norte o zonas de mayor altitud. Las temperaturas invernales son el principal factor limitante para la expansión ascendente de la procesionaria (Battisti et al., 2005). Sin embargo, el cambio climático no sólo se asocia con el incremento de las temperaturas medias, sino también con un aumento de su variabilidad y eventos extremos como por ejemplo las olas de calor o sequías. Estos fenómenos extremos afectan negativamente a las poblaciones de procesionaria. Estudios anteriores han documentado una disminución de las poblaciones de procesionaria tras la ola de calor de 2003 en Francia (Robinet et al., 2014; Bouhot-Delduc, 2005). Además, (Bourougaaoui et al., 2021) demostraron un retroceso de esta especie en el sur de Túnez, impulsado por las tendencias locales de calentamiento que contribuyen a las elevadas tasas de mortalidad.

Las temperaturas elevadas reducen las tasas de eclosión de los huevos y las primeras fases de desarrollo larvario lo que puede reducir las poblaciones en el próximo otoño. Este proceso es especialmente relevante en los límites de distribución sur de la especie (Domingo et al., 2024).

Para entender mejor como afecta la temperatura sobre el ciclo biológico de la procesionaria se citan a continuación diversos umbrales térmicos que afectan a la especie.

1.2.5 Umbrales de desarrollo y actividad:

- Umbral de actividad (<10ºC): A temperaturas inferiores a los 10º C en el interior del nido se detiene la actividad de la colonia. Cuando las noches son muy frías, las orugas se ven obligadas a alimentarse durante el día.
- Umbral de desarrollo (10-20ºC): Entre 10 y 20 ºC, las orugas siguen alimentándose y construyendo el bolsón, pero estas no crecen ni se desarrollan, por lo que esta cuarta fase larvaria puede prolongarse varios meses.
- (20-25º): Cuando la temperatura del bolsón supera los 20-25 ºC las orugas se activan y comienzan a desarrollarse.

1.2.6 Umbrales letales

- T -12ºC: La procesionaria comienza a morirse a temperaturas inferiores a los -12ºC. Las poblaciones de PPM pueden experimentar una reducción drástica debido a umbrales de temperatura letales que oscilan entre − 12 y − 16 °C (Huchon y Demolin., 1970), lo que provoca una caída en su número (Battisti et al., 2005, Buffo et al., 2007, Camarero et al., 2022, Gazol et al., 2019).
- T >30ºC: Temperaturas superiores a los 30- 35 ºC pueden causar la deshidratación y muerte de las larvas expuestas. La temperatura letal de los huevos de procesionaria está dentro del rango de temperatura del aire de 36 a 42 °C (Robinet et al., 2014; H. Santos et al., 2011; Rocha et al., 2017), aunque

algunos autores han propuesto umbrales de temperatura ligeramente inferiores (32°C) (Huchon y Demolin., 1970).

1.2.7 Daños

El principal daño que produce la procesionaria sobre los árboles hospedantes es la defoliación, producida durante la fase de oruga, provocando una merma o debilitamiento del árbol, pero raramente la muerte de este. Normalmente la procesionaria prefiere los árboles localizados en el borde de la masa o individuos jóvenes, si bien también depende de la especie o de otros factores ambientales y de la composición y estructura de la masa.

Por otro lado, la larva tiene pelos urticantes que producen urticarias y reacciones alérgicas a personas y animales, haciendo que en zonas recreativas o de uso doméstico supongan un grave peligro durante el final del invierno o comienzo de la primavera. También son relevantes las perturbaciones que provoca en trabajos silvícolas como podas o recogidas de piñas.

1.2.8 Distribución

Se trata de una especie mediterránea, por lo que la podemos encontrar por toda la costa mediterránea en países como España, Portugal, Francia e Italia, entre otros (Figura 8). En España, donde es una especie endémica, la podemos encontrar prácticamente por toda la península e incluso las islas Baleares, alimentándose de pinos y cedros.

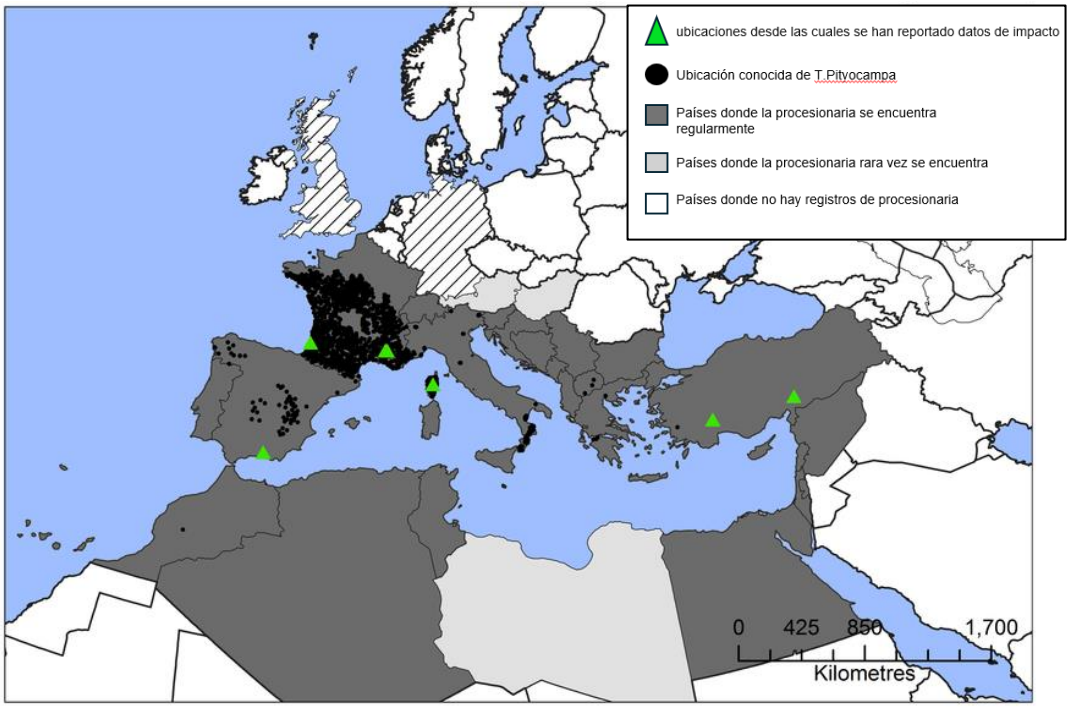


Figura 8. Distribución de procesionaria en registros posteriores a 1990. Fuente: Artículo de (Kriticos, D. J., Leriche, A., Palmer, D. J., Cook, D. C., Brockerhoff, E. G., Stephens, A. E. A., & Watt, M. S. (2013).)

1.2.9 Metodos de control

- Medios químicos
  - Insecticidas
    - Tratamiento aéreo (cumpliendo el RD 1311/2012) a ULV (Ultra Bajo Volumen).
    - Tratamiento terrestre con cañones nebulizadores en zonas de fácil acceso empleando los productos fitosanitarios autorizados.
  - Tratamientos localizados al bolsón durante el otoño e invierno, siempre con los Equipos de Protección Individual adecuados.
  - Endoterapia
    - En pies aislados o pequeños rodales
    - Su aplicación requiere de personal especializado que inyecta directamente en el tronco del pino un producto fitosanitario que lo protege durante uno o dos años a la afección por procesionaria. Se pueden utilizar aquellos productos fitosanitarios recogidos en el Registro de productos Fitosanitarios del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.

  - Control biológico

No es aconsejable llevar a cabo un control químico en niveles de infestación muy elevados, ya que tras las defoliaciones totales la población de procesionaria tiende a regularse (mayores tasas de mortalidad, menor fecundidad y diapausas prolongadas por alimentación insuficiente), pudiendo afectar negativamente sobre los enemigos naturales que ayudan a controlar naturalmente la plaga.

- Medios Físicos
  - Trampa-collarín (Figura 9)
    - Se utiliza cuando tenemos un número reducido de árboles.
    - Se colocan en el tronco para impedir que las orugas alcancen el suelo, evitando el enterramiento y la crisalidación.
    - Se trata de un sistema bastante respetuoso con el medioambiente.
  - Corta y destrucción manual de bolsones
    - Bolsones que estén bien formados.
    - No se cortan aquellos que estén en la guía terminal.
    - En árboles pequeños, durante las primeras etapas, podemos cortar las puestas (antes de la eclosión de los huevos) o los nidos de las orugas de primeros estadios.
- Medios biotecnológicos
  - Trampas cebadas con feromonas (Figura 10)
    - Deben estar autorizadas en el Registro de Productos Fitosanitarios del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación.
    - Se distribuyen las trampas por las zonas de vuelo de los machos (junio-septiembre): 1 trampa/ha en los bordes de masa y claros).

        - Se utilizan para niveles bajos de infestación.
        - Permiten evaluar la densidad de la población.
- Adecuación de la estructura forestal
- Medios biológicos
    - Colocación de nidales para incrementar la presencia de aves insectívoras.
    - Refugios para quirópteros (murciélagos).
    - Contra orugas jóvenes, de primeros estadios, se podrán utilizar en el caso de que existan, los productos formulados a base de microorganismos autorizados para su uso en el Registro de Productos Fitosanitarios del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Para que sean efectivos estos tratamientos a base de microorganismos, se deberán realizar, tras haber comprobado un alto porcentaje de eclosión en las puestas (90%), en actuaciones masivas contra orugas jóvenes.

Figura 9. Trampa de collarín. Fuente: Junta de Castilla y León

Figura 10. Trampa de feromonas. Fuente: Junta de Castilla y León.

2. OBJETIVOS

2.OBJETIVOS

2.1 Objetivo General

El objetivo de este estudio es evaluar el uso de información multiespectral del satélite Landsat para la detección y seguimiento de la defoliación causada por procesionaria en los pinares de Castilla y León. Se pretende analizar cómo diversos índices espectrales derivados de las imágenes multiespectrales, y sus valores de diferencia entre momentos previos y posteriores a la defoliación, pueden contribuir a la identificación y evaluación de áreas afectadas por este patógeno a lo largo del tiempo (desde el 2003 al 2020). El fin último es determinar si es posible realizar un seguimiento mediante técnicas de teledetección que sea de utilidad para la gestión forestal y ayude a planificar medidas de control y prevención ante la procesionaria del pino.

2.2 Objetivos específicos

- Desarrollar y probar una metodología de identificación de las defoliaciones por procesionaria mediante el uso de imágenes multiespectrales Landsat basada en las diferencias espectrales entre momentos previos y posteriores a la defoliación.
- Analizar si los índices espectrales de índice de vegetación de la diferencia normalizada (NDVI), índice de estrés hídrico (MSI), índice normalizado de área quemada (NBR) e índice de vigor relativo (RVI) derivados de las imágenes de Landsat son adecuados para detectar las defoliaciones por procesionaria.
- Comparar el desempeño de tres índices temporales, basados en diferencias espectrales entre momentos de interés: otoño y primavera del año biológico en curso; primavera del año biológico en curso frente a la primavera del año anterior; otoño y primavera del año biológico en curso normalizado por el valor del otoño.

3. METODOLOGÍA

3. METODOLOGÍA

3.1 Área de estudio

Las parcelas objeto de estudio pertenecen a la Red de Seguimiento de Daños en los Bosques de Castilla y León. La Red de Seguimiento de Daños de Castilla y León está vinculada a la red europea de seguimiento de daños en los bosques a través del intercambio de información, la coordinación de acciones y el acceso a recursos y apoyo, lo que contribuye a una respuesta más efectiva y coordinada ante catástrofes y emergencias a nivel regional y europeo.

El origen de esta red europea fue el continuo deterioro del estado de salud de los bosques de Europa, lo que conllevó que la Unión Europea (UE) estableciera en 1986 un programa de seguimiento para ver la evolución de los bosques en la que actualmente participan 39 países. Originalmente la red se estableció, de forma sistemática, una Red de puntos de seguimiento del estado sanitario del arbolado en los bosques que pertenecían a la UE. Esta Red, denominada de Nivel I, ha servido para localizar las zonas dañadas y ver su posterior evolución.

La red de Nivel I es una red sistemática internacional que cuenta con más de 6000 puntos de seguimiento, dispuestos en una cuadrícula de 16 x 16 Km (620 en España) y sobre los cuales se evalúan 24 árboles. Se trata de puntos de muestreo que no tienen un área definida sino un número de árboles fijados por cada país (siendo de 24 árboles en España). Esta red no permitía evaluar algunos factores como el efecto del clima o de los microorganismos descomponedores debido a su escaso nivel de detalle y por ello se desarrolló el denominado Sistema Pan-europeo, para el Seguimiento Intensivo y Continuado de los Ecosistemas Forestales: la Red de la Comisión Europea de Nivel II.

La red de Nivel II incluye parcelas en los ecosistemas forestales más representativos donde se deben hacer estimaciones y medidas numerosas y precisas, caracterizando la masa forestal y su historia, así como el arbolado y su follaje, entre otras.

En Europa existen 600 parcelas en las que se realiza un seguimiento intensivo (parcelas de Nivel II). Concretamente, en España existen 54 parcelas representativas de los principales ecosistemas forestales. De las mismas, 14 son “instrumentadas” (disponen de una serie de dispositivos para mediciones y toma de muestras periódicas de una serie de parámetros, siendo visitadas durante todo el año en intervalos periódicos de 15/30 días). Las 40 parcelas restantes son "básicas". Estas últimas no disponen de aparatos y se visitan solo 1 vez al año entre el 15 de julio y 15 de septiembre, siempre coincidiendo cuando las hojas estén totalmente desarrolladas y antes de la senectud otoñal.

En resumen, la red de Nivel I se enfoca a la primera respuesta y la evaluación preliminar mientras que la Red de Nivel II realiza una evaluación más detallada y especializada, proporcionando información crucial para la planificación y la gestión de la recuperación.

Requisitos de las parcelas de la red:

Estas parcelas deben ocupar una superficie mínima de 50 x 50 metros (0.25 ha) y deben de estar rodeadas por un perímetro adicional con una anchura de 10 metros.

En cada punto de muestreo se seleccionan 24 árboles. Los elegidos deben tener una altura mínima superior a los 60 cm y pertenecer a la clase social predominante, dominante o codominante (Figura 11). En ningún caso se elegirán árboles no dominantes cuyas copas se encuentran debajo del nivel general del conjunto y no reciban luz directa.

Dentro de cada cuadrante de la parcela los árboles se elegirán y marcarán en orden creciente en función de la distancia con el centro. Por lo tanto, el pie número 1 será el más cercano al testigo o centro de la parcela. La distancia máxima de un pie al centro es de 50 m.

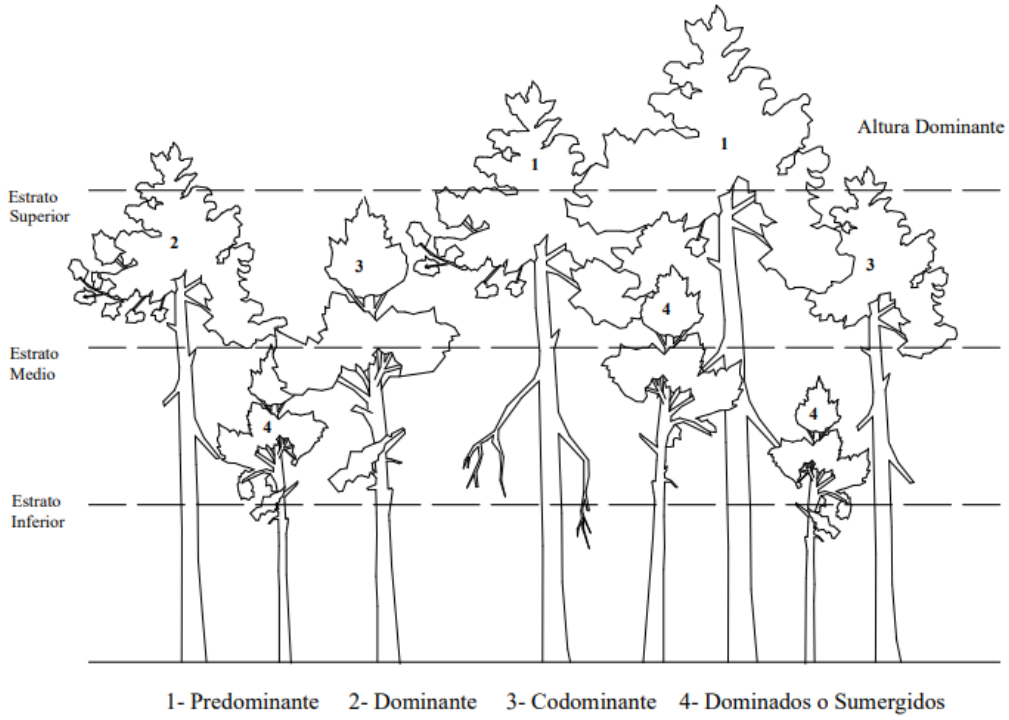


Figura 11. Criterio de selección de los árboles seleccionados. Fuente: Junta de Castilla y León

Las parcelas de la Red de Seguimiento de Daños en los Bosques de Castilla y León se organizan siguiendo los mismos niveles o rangos de la red europea y española para llevar a cabo una evaluación detallada y sistemática de los impactos causados por eventos adversos en la región. La red cuenta, para el conjunto de la comunidad autónoma, con 260 parcelas de muestreo, de las cuales 118 pertenecen a la Red de Rango I (malla 8x8) y 168 a la Red de Rango II (malla 4x4). Las mediciones se realizan anualmente desde 2002 y continúan actualmente.

De las 260 parcelas existentes en la Comunidad Autónoma de Castilla y León, se han seleccionado 53 parcelas revisitadas durante los años 2003 al 2020. Las parcelas

seleccionadas se localizan en las provincias de Soria, Burgos, Segovia y Valladolid. Las parcelas están dominadas por *Pinus sylvestris, Pinus pinea, Pinus nigra, Pinus pinaster* y su principal agente de daño es la procesionaria del pino (figura 12).

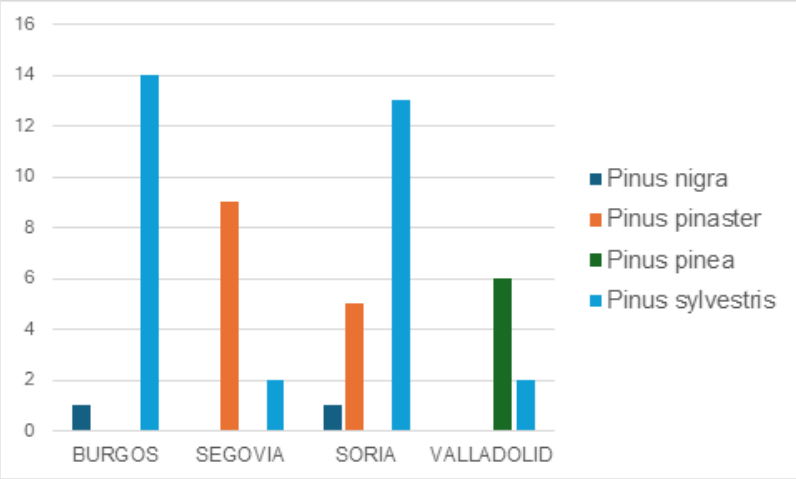


Figura 12. Distribución de las parcelas por provincia y especie

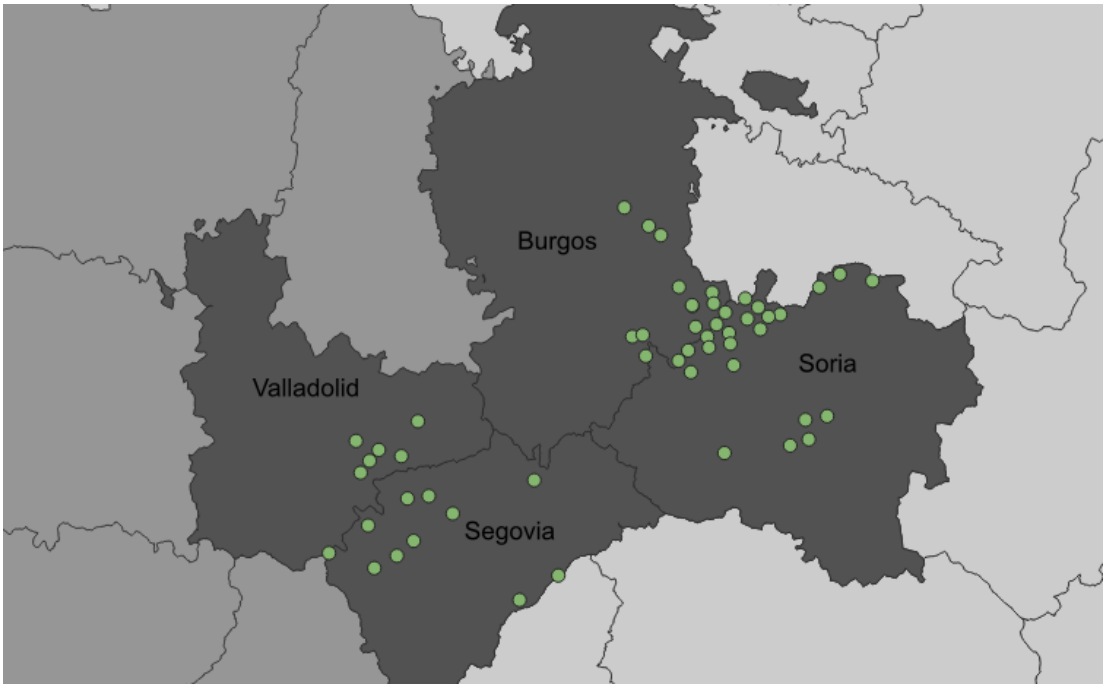


Figura 13. Área de estudio.

3.2 Descarga de datos Landsat

Conociendo el área de estudio y la localización de las 53 parcelas seleccionadas de la red de seguimiento de daños de Castilla y León, se procedió a descargar las imágenes satelitales de Landsat utilizando la página web del explorador de imágenes del Servicio Geológico de los Estados Unidos, por sus siglas en inglés USGS (https://earthexplorer.usgs.gov/).

Concretamente se seleccionaron aquellas imágenes localizadas en el Path 201 y Row 031 con un índice de nubosidad menor al 50% y en los meses de primavera (03/04/05) y de otoño (10/11) entre los años 2002 y 2020. La selección de estas épocas del año se justifica porque la defoliación por procesionaria se produce principalmente en invierno y comienzos de la primavera. Se descargaron las imágenes de los satélites Landsat 5, 7 y 8 de la colección 2 en valores de reflectancia en superficie (figuras 14 y 15).

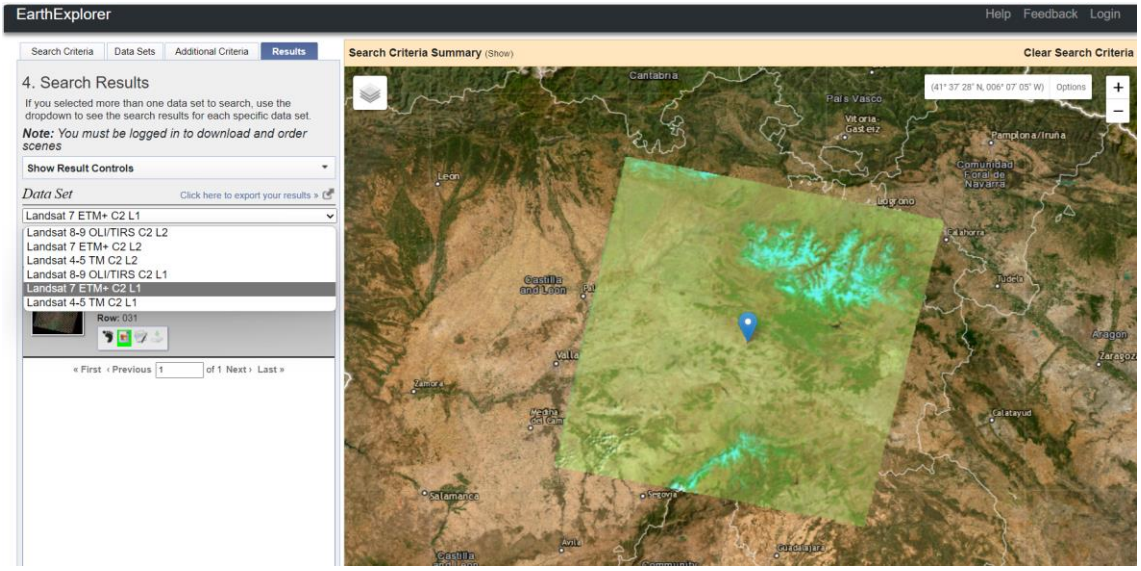


Figura 14. Selección de las imágenes Landsat

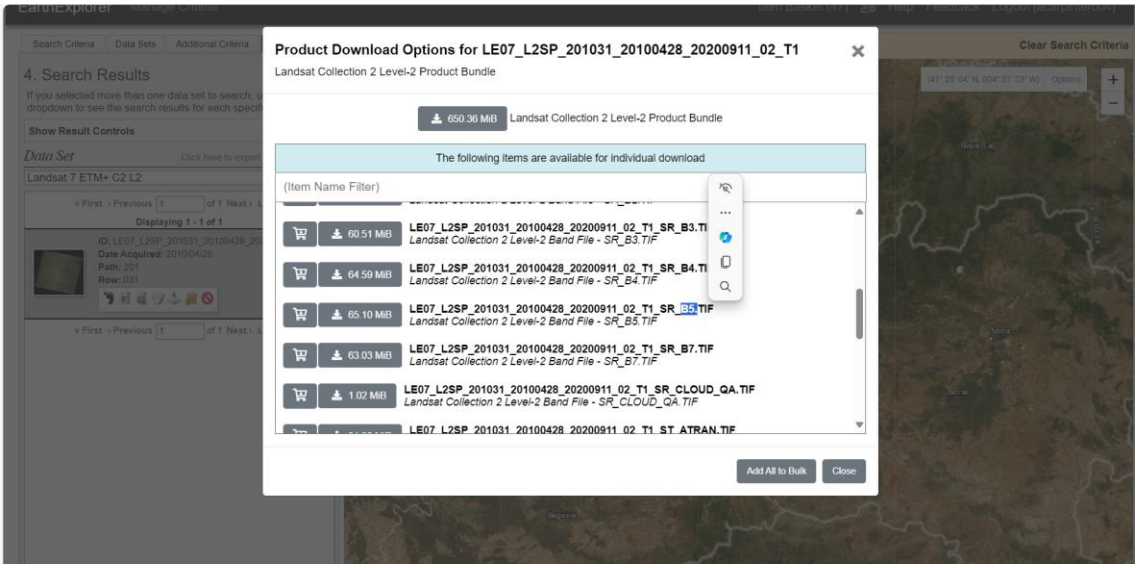


Figura 15. Descarga de las imágenes Landsat

3.3 Cálculo de índices espectrales

Los índices espectrales son combinaciones de bandas espectrales que permiten destacar ciertas características o patrones de la imagen. El uso de índices espectrales es una práctica común para generar nuevas imágenes a partir de do
s o más bandas. Estas nuevas imágenes generadas mejoran las representaciones de objetos como la vegetación. Hay multitud de índices espectrales para caracterizar la vegetación que se pueden derivar de imágenes multiespectrales (Xue y Su 2017). A continuación, se describen los índices espectrales calculados en el presente trabajo.

3.3.1 NDVI

El NDVI cuyas siglas en inglés refieren a Normalized Difference Vegetation Index o en español índice de Vegetación de Diferencia Normalizada, se trata de un índice de vegetación que se utiliza para estimar la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación basándose en la medición de la intensidad de la radiación del infrarrojo cercano y el rojo.

El objetivo general del uso de NDVI es mejorar el análisis de la información sobre la vegetación con datos obtenidos por teledetección. Los estudios han demostrado que el NDVI es eficaz para diferenciar distintos tipos de bosque como la sabana, el bosque denso, los campos no forestales y los agrícolas. También se usa para distinguir entre los bosques perennifolios frente a los caducifolios (Pettorelli et al., 2005). Proporciona información sobre el desarrollo de la vegetación a lo largo del tiempo, o si esta presenta en algún momento alguna anomalía en su desarrollo.

El NDVI se calcula en base a la diferencia que existe entre las bandas espectrales del NIR (infrarrojo cercano) y el rojo (luz roja visible) según la ecuación 1. La clorofila en las plantas refleja la mayor parte de luz del infrarrojo cercano (NIR), mientras que, absorbe la luz roja visible, esto quiere decir que cuanto mayor es la actividad fotosintética de la planta, mayor reflectancia tendrá del infrarrojo cercano y menor reflectancia de la banda roja. (Toribio., 2019).

$$NDVI = (NIR - rojo) / (NIR + rojo) \qquad \text{(ecuación 1)}$$

Los valores de NDVI oscilan entre -1 y 1. De este modo:

- Valores cercanos a -1 indican masas de agua (ríos, lagos, balsas de riego, encharcamientos prolongados, etc.).

- Valores cercanos a 0 (de -0.1 a 0.2) corresponden a zonas áridas de roca, suelos desnudos o nieve.
- Por su parte, valores por encima de 0.2 a 1 nos indican el estado de la vegetación. Cuanto más próximos al valor 1 más vigorosa es la vegetación y, por tanto, menos probabilidad de estrés. Por el contrario, cuanto más próximo a 0,2 es más probable que la planta esté sometida a cualquier tipo de estrés.

Para calcular el NDVI seleccionamos las bandas de rojo e infrarrojo cercano (NIR). En el caso de Landsat 5 y 7 la banda roja se corresponde al número 3 y el NIR al número 4, mientras que en Landsat 8 la banda roja corresponde al número 4 y el NIR al número 5.

Al introducir estas bandas en QGIS procedemos a calcular el índice de vegetación con la calculadora ráster (figura 16).

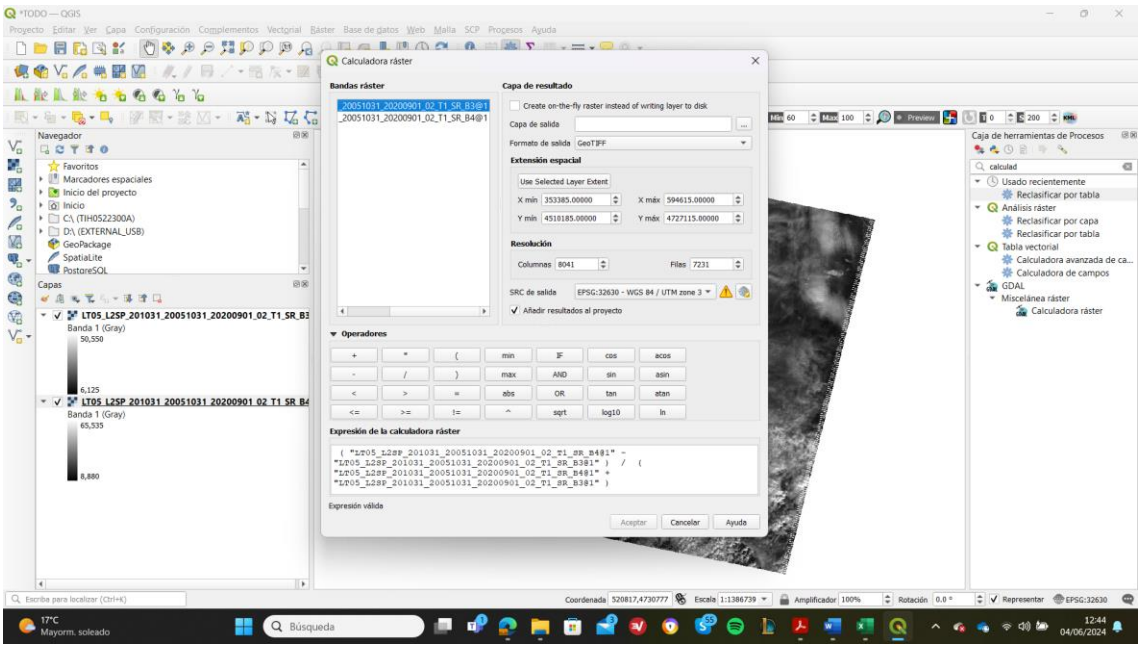


Figura 16. Cálculo del índice NDVI

3.3.2 NBR

El NBR cuyas siglas refieren en inglés a Normalized Burn ratio o en español a índice Normalizado de Área Quemada, es un índice diseñado para resaltar áreas quemadas en grandes zonas de incendios. Es un índice que compara la relación entre la longitud de onda de luz en el infrarrojo cercano (NIR) y el de onda corta (SWIR) según la ecuación 2 para determinar la severidad de un incendio.

Una vegetación saludable muestra una reflectancia muy alta en el NIR y una baja reflectancia en la porción del espectro SWIR, lo contrario de lo que se ve en áreas devastadas por el fuego, que muestran una baja reflectancia en el NIR y alta reflectancia en el SWIR.

$$NBR = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \qquad \text{(ecuación 2)}$$

El índice NBR, al igual que el NDVI, mostrará una relación de valores comprendidos entre -1 y 1. Los valores negativos muestran zonas afectadas por el fuego mientras que valores positivos representan zonas vegetales sanas o en fase de regeneración si previamente ha existido un incendio.
Los valores del índice NBR ofrecidos por el USGS:

- < -0,25: Alto crecimiento de vegetación posterior al fuego
- (-0,25 y -0,1): Bajo crecimiento de vegetación posterior al fuego
- (-0,1 y 0,1): Zonas estables o sin quemar
- (0,1 y 0,27): Zonas quemadas con gravedad baja
- (0,27 y 0,44): Zonas quemadas con gravedad moderada-baja
- (0,44 y 0,66): Zonas quemadas con gravedad moderada-alta
- >0,66: Zonas quemadas con gravedad alta

Para calcular el NBR de Landsat 5, 7 y 8 (Figura 17) elegimos las bandas del infrarrojo de onda corta e infrarrojo cercano. En el caso de Landsat 5,7 y 8 la banda corta corresponde a la banda número 7, y el infrarrojo cercano en las constelaciones 5 y 7 a la banda número 4 mientras que en la constelación 8 la banda 5. Al introducir estas bandas en QGIS procedemos a calcular el índice de vegetación con la calculadora ráster.

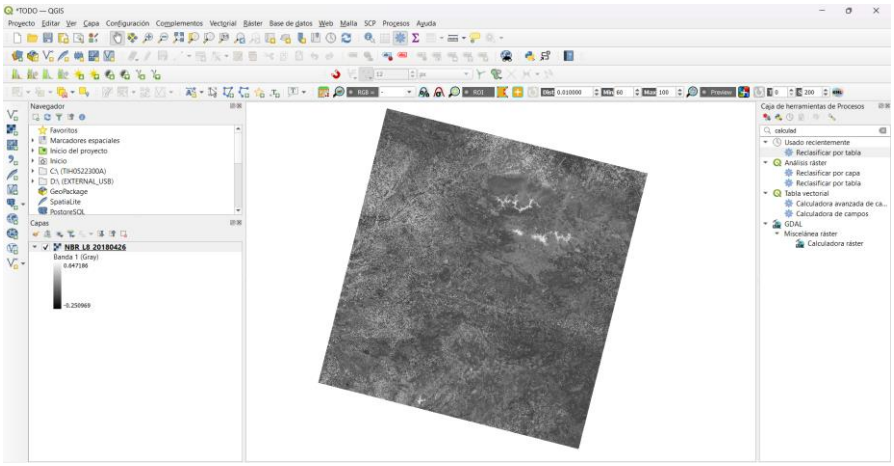


Figura 17. Ejemplo de NBR derivado de Landsat 8

3.3.3 MSI

El MSI cuyas siglas refieren en inglés a Moisture Stress Index o en español Índice de Estrés Hídrico, es una medida de reflectancia que es sensible al aumentar el contenido de agua de la hoja, es decir, es un indicador utilizado para evaluar el contenido de agua en la vegetación. A medida que aumenta el contenido de agua en las hojas de la vegetación, la absorción en longitudes de onda alrededor de 1599 nm también aumenta. La absorción a 819 nm se utiliza como referencia, ya que apenas se ve afectada por cambios en el contenido de agua.

El MSI se utiliza para analizar el estrés en el dosel vegetal, predecir la productividad, modelar riesgos de incendios y estudiar la fisiología del ecosistema.

Para calcular este índice vamos a utilizar el infrarrojo cercano (NIR) y el de onda corta (SWIR) según la ecuación 3.

$$\text{Fórmula del MSI} = SWIR / NIR \qquad \text{ecuación 3}$$

Los valores de este índice van de 0 a más de 3, siendo el rango común para la vegetación verde de 0.2 a 2 (Welikhe et al., 2017). Valores más altos en el MSI indican mayor estrés hídrico y menor contenido de agua. El MSI tiene relación inversa con los otros índices de vegetación relacionados con el agua, los valores más altos indican un mayor estrés hídrico y por lo tanto un menor contenido de agua en el suelo.

Para calcular el MSI de Landsat 5, 7 y 8 vamos a utilizar las mismas bandas que en el índice NBR, escogiendo en el caso de Landsat 5,7 y 8 la banda corta corresponde a la banda número 7, y el infrarrojo cercano en las constelaciones 5 y 7 a la banda número 4 mientras que en la constelación 8 la banda 5. Al introducir estas bandas en QGIS procedemos a calcular el índice de vegetación con la calculadora ráster (figura 18).

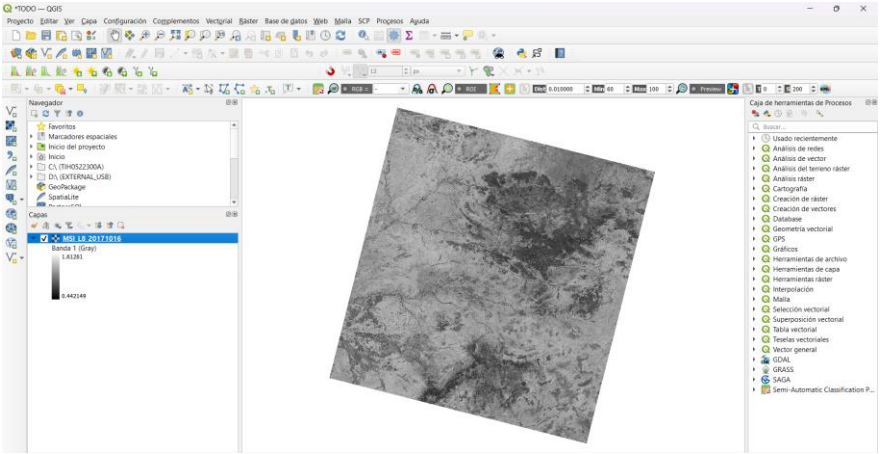


Figura 18. Ejemplo de MSI derivado de Landsat 8

3.3.4 RVI

El índice Relativo de Vigor, en inglés Relative Vigor Index (RVI), es una transformación espectral diseñada para mejorar la contribución de las propiedades de la vegetación. El RVI mejora el contraste entre el suelo y la vegetación, permitiendo distinguir las hojas verdes de otros objetos en la escena y estimar la biomasa relativa presente en la imagen.

A diferencia del NDVI este se enfoca solamente a vegetación el RVI integra también información sobre el suelo y la materia orgánica existente en el mismo (Drones índigo, 2024).

Su cálculo se basa en la relación entre la banda de infrarrojo cercano (NIR) y la banda del rojo, como podemos apreciar en la ecuación 4.

$$\text{Fórmula del RVI} = \text{NIR} / \text{Rojo} \qquad \text{ecuación 4}$$

Los valores de este índice oscilan entre -1 y 1:

- Si el valor del índice relativo de vigor es positivo, nos indica que la vegetación está sana o en crecimiento
- Si el valor es negativo, sugiere que la vegetación puede sufrir estrés

Para calcular el RVI de Landsat 5, 7 vamos a utilizar las bandas 4 y 3 pertenecientes al infrarrojo cercano y a la roja, mientras que para las imágenes de Landsat 8 vamos a emplear las bandas 5 y 4, siendo esta primera el infrarrojo cercano y la banda 4 perteneciente al rojo. Al introducir estas bandas en QGIS procedemos a calcular el índice de vegetación con la calculadora ráster (figura 19).

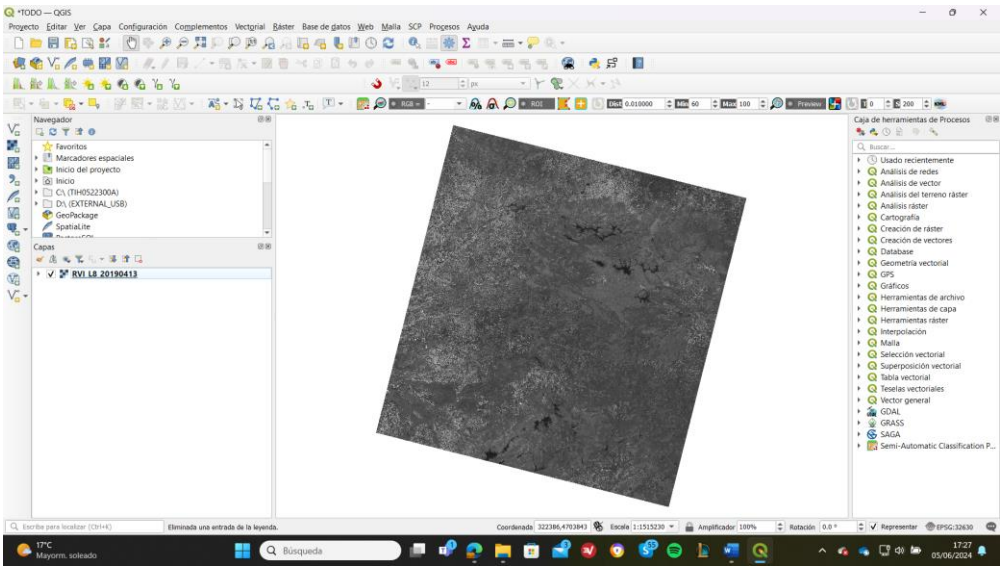


Figura 19. Ejemplo de RVI derivado de Landsat 8

Las imágenes asociadas a los índices espectrales calculados fueron organizadas en diferentes carpetas para cada anualidad, estación a la que pertenecían (otoño y primavera) y satélite de la constelación Landsat con el que fueron adquiridas (Landsat 5, Landsat 7 o Landsat 8). La nomenclatura fue establecida cuidadosamente para facilitar la identificación de los archivos siguiendo el siguiente patrón: índice espectral_satelite_fecha (ejemplo: L7_NDVI_2002/05/03).

Una vez calculados los índices y ordenadas las imágenes se realizó una selección adicional en función de la calidad y la nubosidad existente. Finalmente se seleccionaron de las existentes, la imagen de otoño y la imagen de primavera para cada año que presentaba mejor calidad, siendo recogidas todas en la tabla 1.

Tabla 1. Tabla de las imágenes seleccionadas según la nomenclatura establecida.

	MSI	NBR	RVI	NDVI
2002	MSI_L5_20020430 MSI_L7_20020422	NBR_L5_20020430 NBR_L7_20020422	RVI_L5_20020430 RVI_L7_20020422	NDVI_L5_20020430 NDVI_L7_20020422
2003	MSI_L7_20030527 MSI_L7_20031119	NBR_L7_20030527 NBR_L7_20031119	RVI_L7_20030527 RVI_L7_20031119	NDVI_L7_20030527 NDVI_L7_20031119
2004	MSI_L5_20040302 MSI_L5_20041129	NBR_L5_20040302 NBR_L5_20041129	RVI_L5_20040302 RVI_L5_20041129	NDVI_L5_20040302 NDVI_L5_20041129
2005	MSI_L5_20050524 MSI_L7_20051007	NBR_L5_20050524 NBR_L7_20051007	RVI_L5_20050524 RVI_L7_20051007	NDVI_L5_20050524 NDVI_L7_20051007
2006	MSI_L5_20062705 MSI_L5_20061027	NBR_L5_20062705 NBR_L5_20061027	RVI_L5_20062705 RVI_L5_20061027	NDVI_L5_20062705 NDVI_L5_20061027
2007	MSI_L7_20070506 MSI_L7_20071107	NBR_L7_20070506 NBR_L7_20071107	RVI_L7_20070506 RVI_L7_20071107	NDVI_L7_20070506 NDVI_L7_20071107
2008	MSI_L5_20080313 MSI_L5_20081007	NBR_L5_20080313 NBR_L5_20081007	RVI_L5_20080313 RVI_L5_20081007	NDVI_L5_20080313 NDVI_L5_20081007
2009	MSI_L5_20090503 MSI_L5_20091026	NBR_L5_20090503 NBR_L5_20091026	RVI_L5_20090503 RVI_L5_20091026	NDVI_L5_20090503 NDVI_L5_20091026
2010	MSI_L5_20100522 MSI_L5_20101013	NBR_L5_20100522 NBR_L5_20101013	RVI_L5_20100522 RVI_L5_20101013	NDVI_L5_20100522 NDVI_L5_20101013
2011	MSI_L5_20110306 MSI_L5_20111016	NBR_L5_20110306 NBR_L5_20111016	RVI_L5_20110306 RVI_L5_20111016	NDVI_L5_20110306 NDVI_L5_20111016
2012	MSI_L7_20120401 MSI_L7_20120401	NBR_L7_20120401 NBR_L7_20120401	RVI_L7_20120401 RVI_L7_20120401	NDVI_L7_20120401 NDVI_L7_20120401
2013	MSI_L8_20130412 MSI_L8_20131005	NBR_L8_20130412 NBR_L8_20131005	RVI_L8_20130412 RVI_L8_20131005	NDVI_L8_20130412 NDVI_L8_20131005
2014	MSI_L8_20140517 MSI_L8_20141024	NBR_L8_20140517 NBR_L8_20141024	RVI_L8_20140517 RVI_L8_20141024	NDVI_L8_20140517 NDVI_L8_20141024
2015	MSI_L8_20150402 MSI_L8_20151124	NBR_L8_20150402 NBR_L8_20151124	RVI_L8_20150402 RVI_L8_20151124	NDVI_L8_20150402 NDVI_L8_20151124
2016	MSI_L8_20160303 MSI_L8_20161029	NBR_L8_20160303 NBR_L8_20161029	RVI_L8_20160303 RVI_L8_20161029	NDVI_L8_20160303 NDVI_L8_20161029
2017	MSI_L8_20170407 MSI_L8_20171016	NBR_L8_20170407 NBR_L8_20171016	RVI_L8_20170407 RVI_L8_20171016	NDVI_L8_20170407 NDVI_L8_20171016
2018	MSI_L8_20180426 MSI_L8_20181104	NBR_L8_20180426 NBR_L8_20181104	RVI_L8_20180426 RVI_L8_20181104	NDVI_L8_20180426 NDVI_L8_20181104
2019	MSI_L8_20190413 MSI_L8_20191107	NBR_L8_20190413 NBR_L8_20191107	RVI_L8_20190413 RVI_L8_20191107	NDVI_L8_20190413 NDVI_L8_20191107
2020	MSI_L8_20200314 MSI_L8_20201118	NBR_L8_20200314 NBR_L8_20201118	RVI_L8_20200314 RVI_L8_20201118	NDVI_L8_20200314 NDVI_L8_20201118

3.4 Cálculo de diferencias espectrales entre momentos de interés: otoño y primavera

En este apartado se proponen y comparan tres métodos o escenarios basados en las diferencias espectrales asociadas a periodos temporales previos o posteriores a la defoliación para evaluar cuál de ellos es más eficiente. A continuación, se muestran las fórmulas utilizadas para calcular dichos índices mediante el uso de la calculadora ráster en QGIS:

1º. Diferencia entre la primavera del año biológico en curso y el otoño del año biológico en curso (Sangüesa et al., 2014). Ejemplo:

$$(2022 NDVI\ primavera - 2021\ NDVI\ otoño\ )$$

2º. Diferencia entre la primavera del año biológico en curso y la primavera del año anterior. Ejemplo:

$$(2022\ primavera - 2021\ primavera)$$

3º. Diferencia normalizada entre la primavera del año biológico y el otoño del año biológico en curso con respecto al valor del otoño del año biológico en curso. Ejemplo:

$$\left[\frac{2022\ NDVI\ primavera - \ 2021\ NDVI\ otoño}{2021\ NDVI\ otoño}\right]$$

3.5 Extracción de estadísticas por parcela

Este apartado incluye los procesos metodológicos para obtener las estadísticas para las parcelas objeto de estudio.

3.5.1 Selección de parcelas

En este paso vamos a seleccionar las parcelas que se encuentran espacialmente incluidas en las imágenes Landsat (figura 20), gracias a la herramienta “cortar” de QGIS.

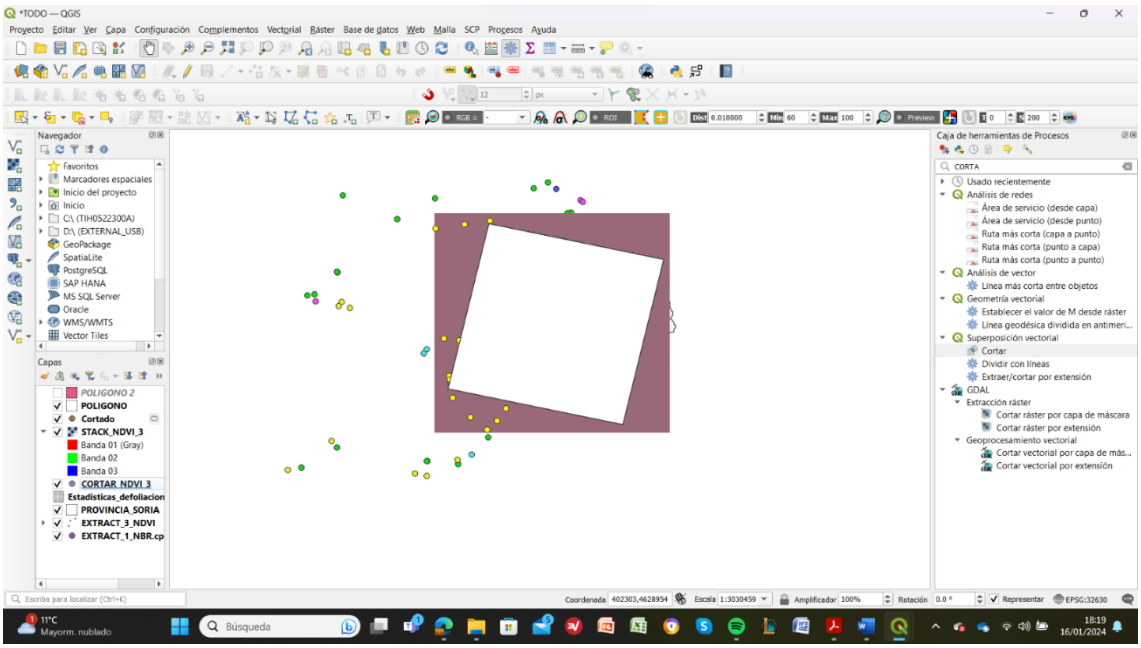


Figura 20. Polígono que incluye las parcelas que intersectan espacialmente con la imagen Landsat.

3.5.2 Buffer de las parcelas seleccionadas

Tras seleccionar las parcelas de interés, crearemos un buffer con 45 m de distancia y de formato cuadrado (figura 21). La herramienta buffer calcula un área en torno a los objetos espaciales de una capa de entrada, utilizando una distancia fija o establecida en un campo de la tabla de atributos.

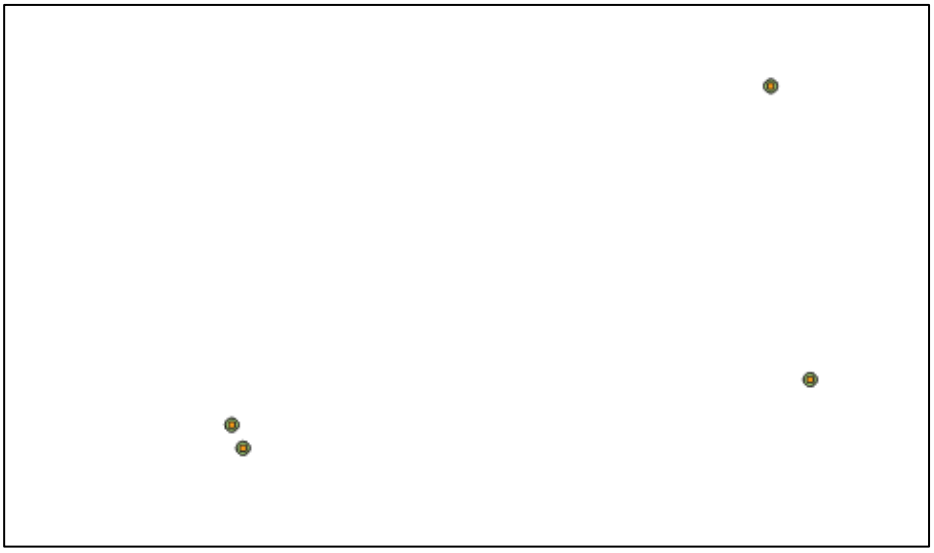


Figura 21. Buffer vectorial cuadrado en las parcelas seleccionadas.

3.5.3 Generación del Stack (combinar)

Para obtener los valores de cada uno de los índices de vegetación correspondientes a las parcelas procedemos a agrupar los ráster en varios raster multicapa denominados por su nomenclatura en inglés “stack”. El stack permitió combinar los 18 años (2002-2020) de cada índice (4 índices) y para cada método o escenario (3). Los métodos o escenarios son los establecidos en el apartado 3.4 basados en el cálculo de diferencias espectrales entre momentos de interés: otoño y primavera. En suma, se obtuvieron un total de 12 raster “stack”.

Para la generación de los “stack” se utilizó la herramienta “combinar” en QGIS. Se seleccionaron las capas de entrada a incluir en este procedimiento, siendo estos inputs las imágenes de nuestros índices manteniendo el orden cronológico de los datos, es decir, (2002-2003) / (2003-2004) / (2004-2005) etc. La falta de imágenes en otoño 2012 condicionó el análisis para dicho año concreto en los métodos 1 y 3; donde el primer método muestra la diferencia entre la primavera y el otoño del año biológico en curso mientras que el método 3 muestra la diferencia normalizada entre la primavera y otoño del año biológico en curso con respecto al valor del otoño del año biológico en curso. En consecuencia, en lugar de trabajar con una serie temporal de 18 años, dada la falta de imágenes en el año 2012 se trabajará con un raster multibanda de 17 anualidades. Para garantizar que los valores de cada anualidad se conservan seleccionamos la opción “generar bandas separadas” como podemos ver en la figura 22. La nomenclatura utilizada para denominar a los stack seguía el siguiente patrón: stack_método_índice (Ej.: STACK_1_NDVI).

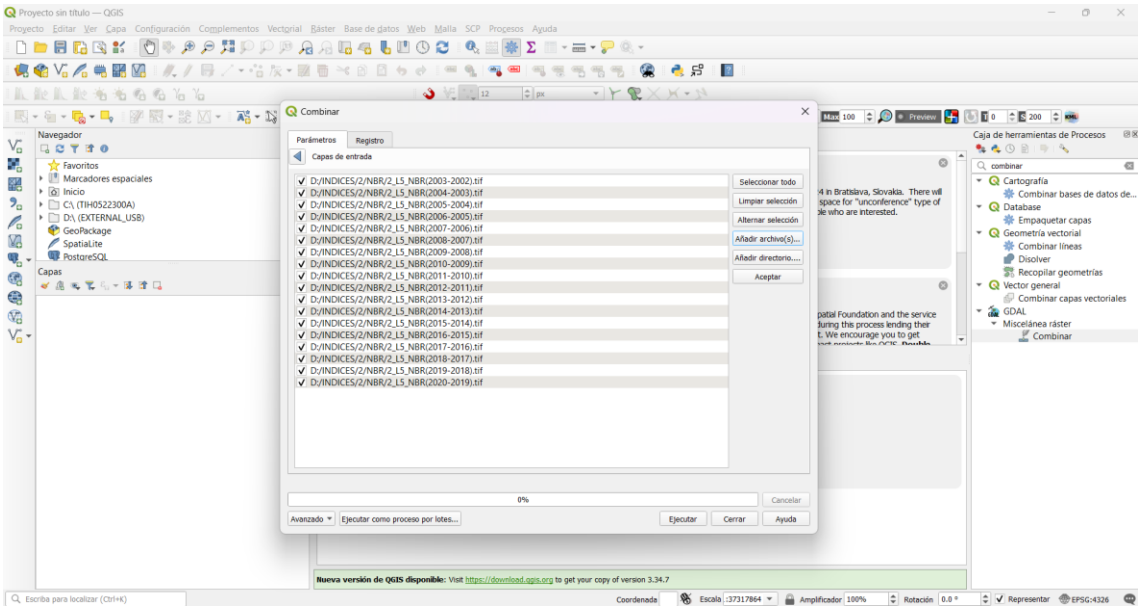


Figura 22. Ejemplo de la herramienta “Combinar” para la realización del “stack”.

3.5.4 Estadísticas zonales por parcela

Para extraer los valores y estadísticas de las celdas de una capa raster a partir de una capa de puntos (parcelas seleccionadas) utilizaremos la herramienta “estadísticas de zona” de QGIS. Concretamente se extrajeron las estadísticas de media, mínimo y máximo de las parcelas seleccionadas (figura 23).

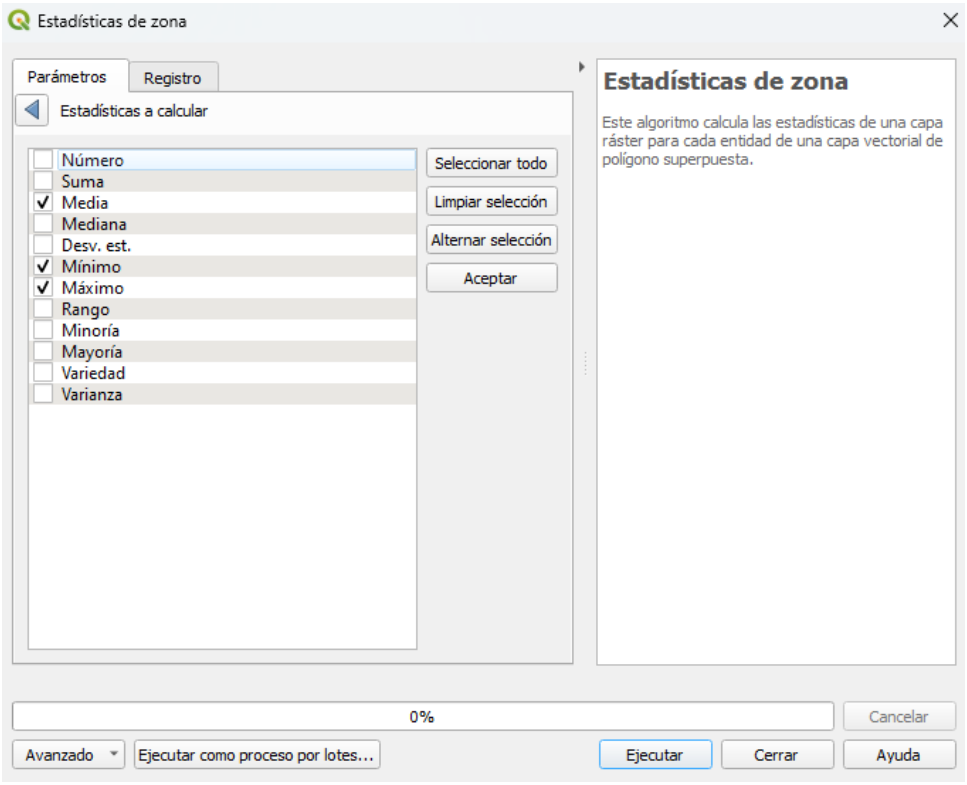


Figura 23. Obtención de los valores de las parcelas

3.6. Análisis estadístico

Mediante análisis estadístico vamos a poder examinar, comprender y resumir nuestros datos. Con ello vamos a extraer información significativa y útil de conjuntos de datos, lo que puede ayudar en la toma de decisiones, la comprensión de tendencias, la identificación de patrones, la evaluación de hipótesis y la predicción de resultados futuros, entre otros. Este análisis implica la aplicación de diferentes métodos estadísticos para describir, resumir y visualizar los datos, así como para realizar inferencias sobre la población a partir de la muestra analizada.

3.6.1 Histogramas de valores de defoliación por especies

En este apartado vamos a analizar la defoliación medida en campo que se ha producido en cada una de las parcelas de las diferentes especies durante el periodo analizado (2002-2020). Los histogramas permiten visualizar el número de parcelas con respecto a los valores de defoliación que se produce a lo largo de los años en cada especie.

3.6.2 Categorización en clases de defoliación

Partiendo de los valores de defoliación por especie observados en los histogramas, se procedió a clasificar nuestros datos en clases o niveles de defoliación. Concretamente se diferenciaron 3 categorías (defoliación baja, defoliación media y defoliación alta). La categorización se realizó en entorno R como podemos ver en la figura 24.

```
# 3 classes test (baja defoliacion, media defoliacion, alta defoliacion)

datos<- transform(datos_v0,def_mean_clases=ifelse(def_mean<20, 0,
                                                  ifelse(def_mean >=20 & def_mean <=40,1,
                                                         ifelse(def_mean >40,2,3))))
#
```

Figura 24. Categorización de los datos por nivel de defoliación en entorno R.

3.6.3 Análisis de varianza

Se trata de una técnica que permite comparar las varianzas entre las medias de diferentes muestras. El análisis de la varianza sirve para analizar si existe alguna diferencia estadísticamente significativa entre las medias de más de dos poblaciones. En nuestro caso, vamos a comparar la varianza de cada una de nuestras clases permitiéndonos ver, si estas presentan diferencias estadísticamente significativas o no.

Para seleccionar el método de análisis de varianza a aplicar a nuestros datos, debemos previamente comprobar su distribución. En caso de ser una distribución normal podríamos analizar las varianzas mediante un test paramétrico como ANOVA. En caso contrario deberíamos aplicar un test no paramétrico como por ejemplo Kruskal Wallis. Ante estas premisas comprobamos la normalidad de los datos mediante el test de Shapiro Wilk y mediante histogramas (véase apartados 3.6.4 a 3.6.7).

3.6.4 Test de Shapiro Wilk

Este test estadístico nos permite comparar si los datos de los índices espectrales calculados siguen una distribución normal teórica. Si los datos se asemejan significativamente a la distribución normal, se concluye que los datos son normales. Por otro lado, si existe una diferencia significativa, se concluye que los datos no son normales.

En primer lugar, extraemos aquellas columnas que no son numéricas, es decir, aquellas que en su contenido tengan nombres o palabras como la columna de especies y eliminamos aquellas filas o columnas que solo tengan ceros (figura 25).

```
# 3.1. Shapiro test
df<-datos#[,-1:-11]

# Etract names for numeric columns
numeric_vars<-df%>%select_if(is.numeric)%>%names()
# Drop non numeric columns
df<-df%>%
  select(all_of(numeric_vars))

# Extract zero variance variables first
zero_var_columns<-nearZeroVar(df, saveMetrics = TRUE)%>%
  filter(zeroVar==TRUE)%>%
  row.names()
# Show
zero_var_columns
# Drop zero variance columns
df<-df%>%
  select(-all_of(zero_var_columns))
```

Figura 25. Preparación de los datos para el test de Shapiro Wilk en entorno R

El test de Shapiro Wilk se realiza sobre el conjunto de columnas numéricas con un nivel de insignificancia del 95%. El p-valor indica con el 95% de probabilidad si la hipótesis de normalidad es cierta.

Tras el cálculo del test de Shapiro Wilk se observó que las variables no eran normales, y se procedió a transformar los datos a logaritmo o a raíz cuadrada para ver si presentaban una distribución normal (apartados 3.6.5 y 3.6.6).

3.6.5 Transformar a logaritmo

Primero transformamos nuestros datos a logaritmo (figura 26), para ello seleccionando las columnas de nuestros índices [1-12] (MSI, NBR, NDVI, RVI). Posteriormente transformamos los valores que sean infinito convirtiéndolos en valor 0 y realizamos nuestro test de Shapiro Wilk.

```
#transformar a logaritmo
df_log<-log(abs(df[,1:ncol(df)]))
df<-cbind(df[,1:12],df_log)
df[df == -Inf] <- 0
```

datos_v0	826 obs. of 30 variables
df	826 obs. of 39 variables
df_log	826 obs. of 27 variables

Figura 26. Transformar nuestros datos a logaritmo

Ejecutamos nuestro test de Shapiro Wilk y vemos que, nuevamente, nuestras variables no son normales así que vamos a transformar los datos a raíz cuadrada.

3.6.6 Transformación a raíz

Al igual que en la transformación a logaritmos, vamos a seleccionar las columnas que contengan los datos de nuestros índices, transformarlos a raíz cuadrada y tras ello ejecutar el test de Shapiro Wilk. Al ejecutar el test de Shapiro Wilk vemos que, de nuevo, nuestras variables no son normales.

Dado que nuestras variables no son normales aun realizando las transformaciones mencionadas, no vamos a realizar un análisis de varianza con ANOVA sino que vamos a hacer una prueba de Kruskall Wallis, un método similar al ANOVA pero para datos que no siguen una distribución normal.

3.6.7 Histogramas de las variables Landsat

Tras haber realizado los test de normalidad para las variables originales o transformadas a logaritmo se han representado, aun sabiendo que los resultados de los test estadísticos son autosuficientes, gráficamente los valores de los índices de vegetación (NDVI, MSI, NBR y RVI) para cada uno de los escenarios establecidos (1,2,3) en el apartado 3.4 para una mejor comprensión de la distribución de los datos.

3.6.8 Prueba de Kruskall Wallis

La prueba de Kruskal-Wallis se utiliza para determinar si hay diferencias significativas entre dos o más grupos de muestras independientes cuando los datos no cumplen con los supuestos de normalidad necesarios para realizar un análisis estadístico de tipo ANOVA. Con esta prueba vamos a poder ver si hay alguna diferencia entre alguna de nuestras variables. La prueba de Kruskal-Wallis se realizó en entorno R.

3.6.9 Test de Dunn

Si los resultados de una prueba de Kruskal-Wallis son estadísticamente significativos, entonces es apropiado realizar una prueba de Dunn para determinar exactamente qué grupos son diferentes entre sí. Esta prueba nos va a permitir ver si existen diferencias estadísticamente significativas entre las clases de defoliación que establecimos previamente (0,1,2).

3.6.10 Gráficas de las variables seleccionadas en Kruskall Wallis

En este paso vamos a mostrar y explicar gráficamente mediante un diagrama de caja y bigotes (Bloxplot) aquellas variables que presenten diferencias estadísticamente significativas entre las clases. Con ello veremos la dispersión de los datos, como se distribuyen según su categoría y que similitudes o diferencias tienen entre sí.

La principal característica del diagrama de caja y bigotes es que permite visualizar rápidamente la dispersión de una serie de datos, ya que indica los cuartiles, la mediana, los valores extremos y los valores atípicos de los datos. Los límites de la

caja indican el primer y el tercer cuartil (Q_1 y Q_3). Y la línea horizontal dentro de la caja es la mediana (equivalente al segundo cuartil Q_2). Los límites de los bigotes (o brazos) son los valores extremos, es decir, el valor mínimo y el valor máximo de la serie de datos. Los puntos fuera de los bigotes muestran los valores atípicos.

3.7 Cartografía

En este apartado se va a mostrar como se ha realizado la cartografía distinguiendo las 3 clases de defoliación.

Lo primero de todo es descargarnos el Mapa Forestal Español a través de MFE de máxima actualidad. Castilla y León (miteco.gob.es),en Qgis vamos a seleccionar las zonas del Mapa Forestal Español (MFE) que incluyan a nuestras parcelas gracias a la herramienta “cortar”.

Tras su selección realizaremos una categorización de los índices NDVI y NBR en función de los valores medios de cada índice espectral para cada una de las clases de defoliación determinadas. Para ello vamos a ver en las tablas 9 y 10 los valores medios de cada clase para los índices NDVI y NBR.A continuación vamos a realizar esta categorización sobre una imagen del año 2016 de cada uno de los índices. Se ha elegido el 2016 ya que es un año que podemos presenciar unos valores altos de defoliación, como podemos ver en los histogramas de defoliación por especie.

Para ello en vamos a utilizar la herramienta “reclasificar por tabla” en Qgis y vamos a introducir los valores de las tablas 9 y 10 para cada índice correspondiente (Figura 27).

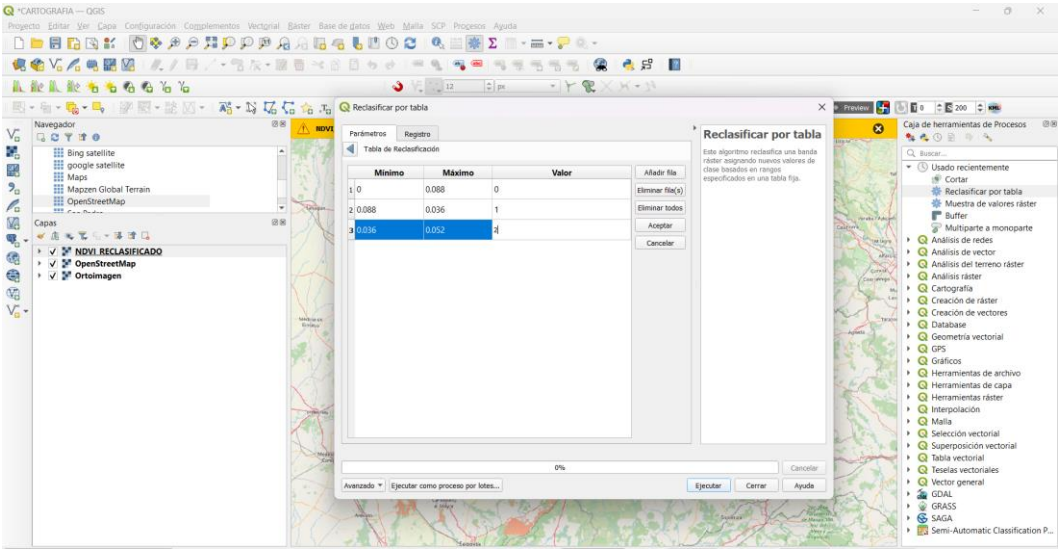


Figura 27. Categorización del índice NDVI en función de los valores medios

Una vez establecidas las categorías, estas se van a diferenciar por una escala de colores.

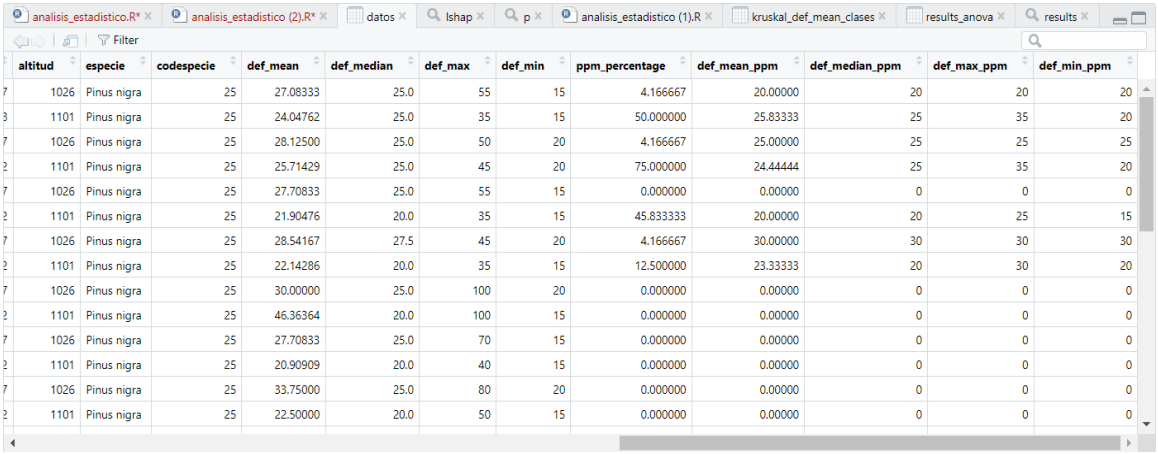
4. RESULTADOS

4.RESULTADOS

4.1 Determinación de las clases de defoliación en base a los histogramas de defoliación por especie

Pinus nigra: Según se recoge en las figuras 12 y 26 vemos como tan solo tenemos dos parcelas de esta especie. Las dos parcelas de *P. nigra* han sufrido defoliación persistente a lo largo del periodo, con un porcentaje de defoliación media del 25% entre los años 2003-2020 como podemos observar en la tabla 2. Cabe destacar el año 2014 y el año 2016 con unos porcentajes del 46% y 33%, respectivamente (figura 28). Por otro lado, los valores mínimos de defoliación se encuentran en los años 2008 y 2006. De estas dos parcelas la que mayor defoliación presenta está situada a menor altitud (figura 29).

Figura 28. Histograma de defoliación media en las parcelas de *Pinus nigra*



analisis_estadistico.R* | analisis_estadistico (2).R* | datos | lshap | p | analisis_estadistico (1).R | kruskal_def_mean_clases | results_anova | results

Filter

	altitud	especie	codespecie	def_mean	def_median	def_max	def_min	ppm_percentage	def_mean_ppm	def_median_ppm	def_max_ppm	def_min_ppm
7	1026	Pinus nigra	25	27.08333	25.0	55	15	4.166667	20.00000	20	20	20
3	1101	Pinus nigra	25	24.04762	25.0	35	15	50.000000	25.83333	25	35	20
7	1026	Pinus nigra	25	28.12500	25.0	50	20	4.166667	25.00000	25	25	25
2	1101	Pinus nigra	25	25.71429	25.0	45	20	75.000000	24.44444	25	35	20
7	1026	Pinus nigra	25	27.70833	25.0	55	15	0.000000	0.00000	0	0	0
2	1101	Pinus nigra	25	21.90476	20.0	35	15	45.833333	20.00000	20	25	15
7	1026	Pinus nigra	25	28.54167	27.5	45	20	4.166667	30.00000	30	30	30
2	1101	Pinus nigra	25	22.14286	20.0	35	15	12.500000	23.33333	20	30	20
7	1026	Pinus nigra	25	30.00000	25.0	100	20	0.000000	0.00000	0	0	0
2	1101	Pinus nigra	25	46.36364	20.0	100	15	0.000000	0.00000	0	0	0
7	1026	Pinus nigra	25	27.70833	25.0	70	15	0.000000	0.00000	0	0	0
2	1101	Pinus nigra	25	20.90909	20.0	40	15	0.000000	0.00000	0	0	0
7	1026	Pinus nigra	25	33.75000	25.0	80	20	0.000000	0.00000	0	0	0
2	1101	Pinus nigra	25	22.50000	20.0	50	15	0.000000	0.00000	0	0	0

Figura 29. Defoliación de las dos parcelas de *P.nigra*

Tabla 2. Media, máximos y mínimos de los valores de defoliación de *P.nigra* por año

Año	Promedio de Valores	Máximos	Mínimos
2003	26.45	30.41	22.50
2004	23.51	27.70	19.31
2005	25.43	27.91	22.95
2006	20.13	22.08	18.18
2007	23.72	25.62	21.81
2008	20.85	23.75	17.95
2009	21.20	23.54	18.86
2010	22.49	25.20	19.77
2011	24.31	27.50	21.13
2012	26.71	32.29	21.13
2014	28.12	33.75	22.50
2015	24.30	27.70	20.90
2016	38.18	46.36	30
2017	25.34	28.54	22.14
2018	24.80	27.70	21.90
2019	26.92	28.12	25.71
2020	25.56	27.08	24.04
Total general	**25.18**	**46.36**	**17.95**

Pinus sylvestris: En las parcelas de esta especie apreciamos que su media de defoliación es de un 23.74%, donde el año 2012 es el que mayor valor medio de defoliación presenta con un 27%. Si nos fijamos en parcelas concretas, en 2006 una de las parcelas alcanza un 95% de defoliación y en el año 2016 una de las parcelas sufre un 71% de defoliación como se observa en la figura 29 y la tabla 3. Por el contrario, los años 2007, 2008, 2010 y 2020 presentan los valores de defoliación media más bajos en torno al 21%.

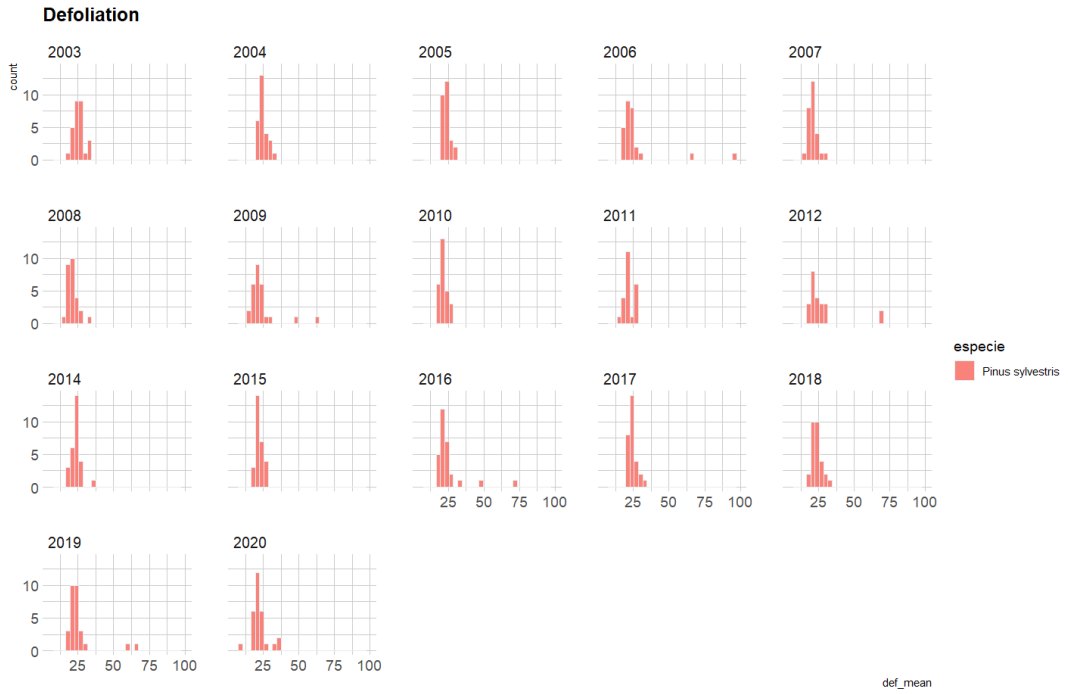


Figura 30. Histograma defoliación media de *Pinus sylvestris.*

Tabla 3. Media, máximos y mínimos de los valores de defoliación de *P.sylvestris* por año.

Año	Promedio de valores	Valores Máximos	Valores Mínimos
2003	25.35	33.33	17.29
2004	24.67	34.25	19.79
2005	23.67	28.57	19.79
2006	26.37	95	18.12
2007	21.06	30.41	15
2008	21.14	31.66	15
2009	23.78	63.33	15
2010	21.65	28.12	18.68
2011	22.17	27.85	15.83
2012	27.29	69.79	18.75
2014	23.34	37.29	16.57
2015	22.46	27.50	18.75
2016	24.60	71.25	17.91
2017	24.50	32.91	20
2018	23.74	31.66	18.75
2019	25.54	66.45	18.95
2020	22.43	36.45	10
Total general	**23.74**	**95**	**10**

Pinus pinaster: En las parcelas de esta especie apreciamos que la media de defoliación es de un 26% (tabla 4). Los años con valores medios máximos de defoliación son el 2005, 2012, 2018 y 2019. Si nos fijamos en los valores mínimos, vemos como en el año 2008 presenta una defoliación media del 22.78%.

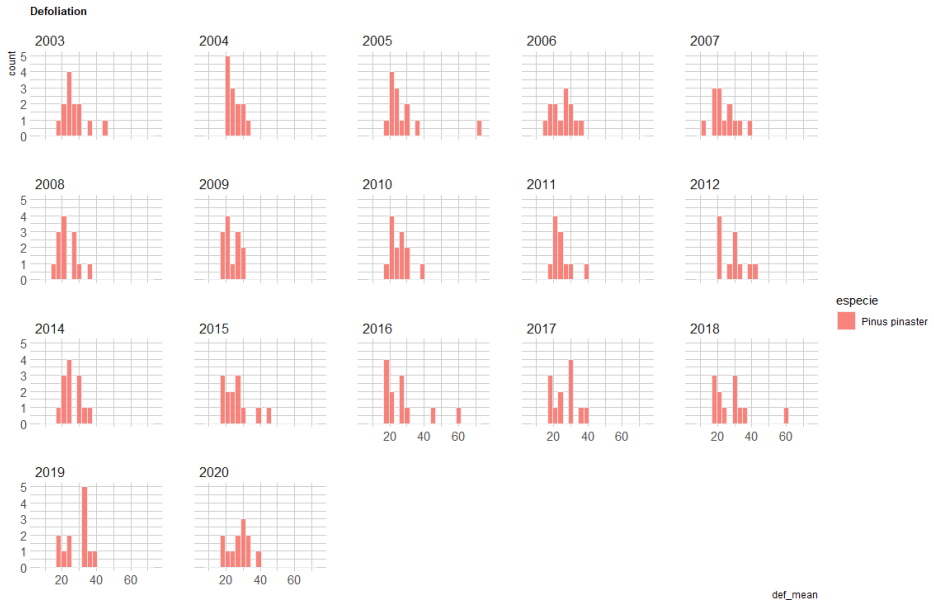


Figura 31. Histograma defoliación media de *Pinus pinaster.*

Tabla 4. Media, máximos y mínimos de los valores de defoliación de *P.pinaster* por año.

Año	Promedio de valores	Valores máximos	Valores mínimos
2003	26.83	45.00	17.91
2004	24.93	34.16	19.79
2005	28.42	71.87	19.37
2006	25.45	37.29	16.25
2007	23.81	40.41	13.33
2008	22.78	35.20	14.37
2009	23.23	29.58	17.08
2010	25.09	37.70	18.75
2011	24.85	39.58	19.09
2012	28.11	41.45	19.58
2014	25.94	37.50	18.54
2015	25.79	43.75	17.95
2016	27.73	60.83	17.95
2017	26.61	39.79	18.18
2018	28.62	60.62	18.18
2019	28.69	38.54	18.18
2020	27.87	40.41	18.63
Total general	**26.11**	**71.87**	**13.33**

Pinus pinea: Observamos que el promedio de defoliación de esta especie es de en torno al 25% (Tabla 5) donde el porcentaje más alto se alcanzan en el último año (2020) alcanzando un promedio del 39.6% y donde a su vez encontramos el máximo con una parcela concreta que alcanza el 65% de defoliación. Otros años a destacar son el 2017 y el 2019 donde se alcanzan valores medios próximos al 30%. Por el contrario, el mínimo lo vemos en el 2008 donde hasta 3 de sus parcelas (figura 32) han sufrido solo un 10.7% de defoliación seguido del 2007 donde 2 de sus parcelas solo se han defoliado un 11.4%, presentando a su vez los valores medios más bajos del periodo analizado e inferiores al 20% de defoliación.

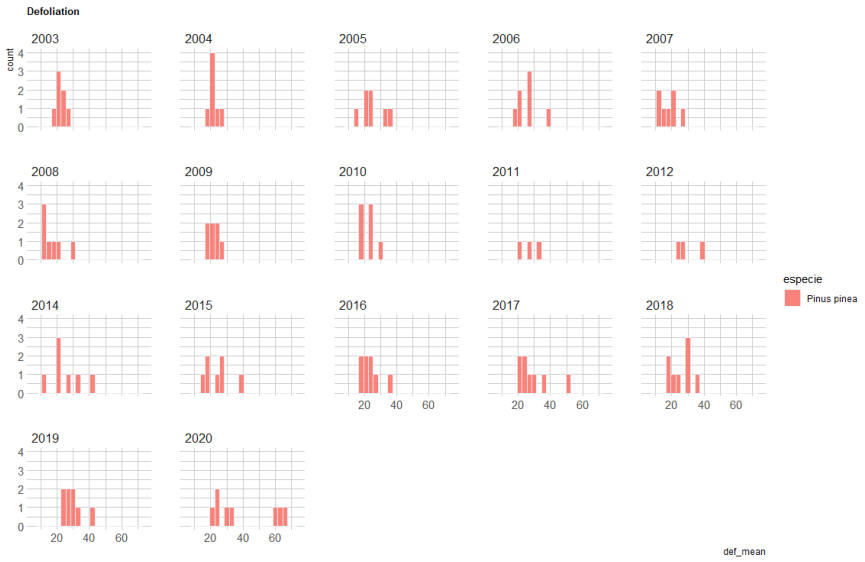


Figura 32. Histograma defoliación media de *Pinus pinea.*

Tabla 5. Media, máximos y mínimos de los valores de defoliación de *P.pinea* por año.

AÑO	Promedio de valores	Valores máximos	Valores mínimos
2003	21.90	26.25	17.38
2004	22.69	27.85	19.28
2005	24.49	37.29	13.57
2006	25.59	40.41	18.33
2007	18.05	25.62	11.42
2008	17.08	30.62	10.71
2009	21.75	27.50	17.50
2010	22.49	30.25	16.66
2011	27.00	32.29	21.57
2012	29.15	38.75	22.63
2014	25.55	40.83	12.91
2015	24.27	40	15.62
2016	23.60	36.25	17.91
2017	29.43	52.50	20.78

2018	26.05	35.83	18.33
2019	29.85	42.91	22.70
2020	39.15	65.83	22.08
Total general	**25.25**	**65.83**	**10.71**

A pesar de ser que el *P.nigra* es considerada la especie más susceptible a la procesionaria (Hodar, et al., 2002; Hodar et al., 2012.,) las dos parcelas analizadas en nuestra zona de estudio, posiblemente por su ubicación, presentan niveles de defoliación media similares a los de P. pinea y algo inferiores a las parcelas de *P. pinaster*. Cabe mencionar que se trata de un número muestral muy bajo por lo que no se puede generalizar ni es un valor representativo del conjunto de Castilla y León. Por su parte, las parcelas de *P. sylvestris* son las que presentan niveles de defoliación más bajo (23.74%).

El análisis descriptivo de los valores de defoliación mediante histogramas nos ha servido para determinar 3 clases o categorías de defoliación que se describen a continuación:

- Clase 0 (defoliación baja): incluye las parcelas con una defoliación menor al 20% (Def<20)
- Clase 1 (defoliación media): incluye las parcelas con una defoliación entre 20% y 40% (20<Def<40)
- Clase 2 (defoliación alta): incluye las parcelas con una defoliación mayor de 40% (Def>40)

4.2 Análisis de normalidad de las variables Landsat a partir de los histogramas y el test de Shapiro Wilk

En los histogramas calculados a partir de los valores de diferencia de los índices espectrales relativos a los 3 escenarios vemos como la mayoría de ellas parecería que tienden a la normalidad si bien según el test de Shapiro Wilk no presentan una distribución normal (figuras 33,34 y 35).

Si nos fijamos en el índice NDVI, vemos como en el primer escenario (diferencia de NDVI entre primavera y otoño del año biológico) la mayoría de los valores se encuentran entre el -0.1 y 0.1, si bien parecen observarse dos poblaciones por debajo y por encima del 0.1. En el segundo escenario no hay valores 0 lo cual rompe la normalidad. Esta tendencia se observa en cada uno de los segundos escenarios (diferencia entre la primavera del año biológico en curso y la primavera del año anterior) de los restantes índices calculados. En el tercer escenario (diferencia normalizada entre la primavera del año biológico y el otoño del año biológico en curso con respecto al valor del otoño del año biológico en curso) hay un mayor rango de los datos, y vemos como hay una población en torno a -3 y otra en torno a 0.

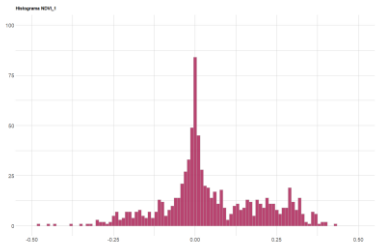
Respecto al índice RVI, en el primer escenario vemos que no tenemos ningún dato en el valor 0. En el tercer escenario vemos como entre los valores que van desde el 0.25

al 1 distinguimos una población y a partir del 1 apreciamos diferentes poblaciones aisladas.

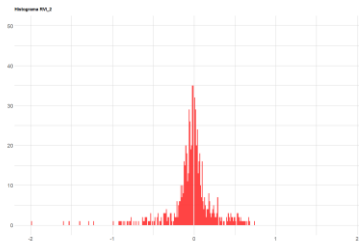
Fijándonos en el índice MSI observamos que hay una población que experimenta una variación entre los datos desde el 0 al 0.25, ocurriendo lo mismo en el tercer escenario, en como a partir del 0 hay un aumento del MSI en la población situada entre el 0 al 0.25. Así mismo, vemos como en el segundo escenario no tenemos ningún dato en el valor 0 rompiendo esta normalidad, ya que como podemos ver, hay dos poblaciones en torno al -2.5 y 2.5.

El índice NBR presenta en el primer escenario dos subpoblaciones una en torno al 0 y otra en torno al -0.3. En el segundo escenario se aprecia la ausencia de datos en el valor 0 y en el tercer escenario vemos como hay un aumento del NBR en los valores comprendidos entre el -0.7 y el 0 distinguiendo claramente una población.

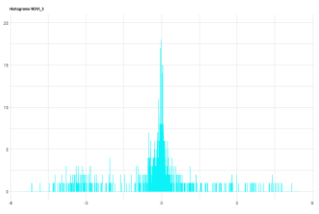
En la mayoría de las gráficas vemos como estas nos siguen un patrón de normalidad. Sin embargo, en el caso del índice NDVI para el escenario 3 observamos algo de simetría, haciéndonos plantear si estos siguen una normalidad o no algo que hemos confirmado con el test de Shapiro Wilk (tabla 5) en la que observamos que ningún índice sigue un patrón de normalidad con p-values inferiores a 0.05.



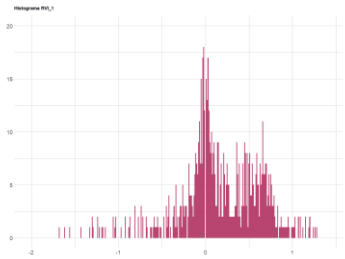
NDVI_1



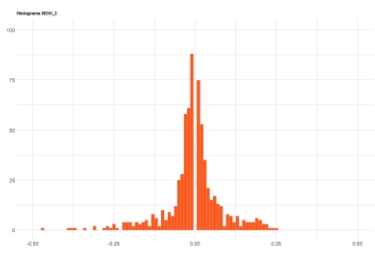
NDVI_2



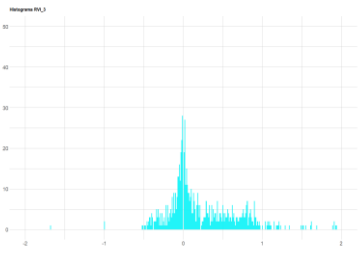
NDVI_3



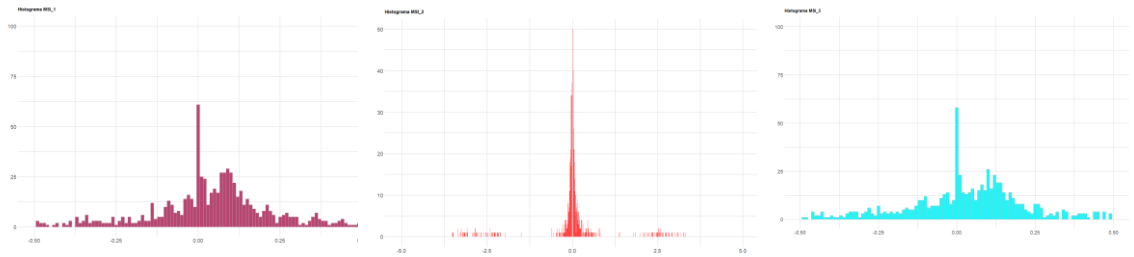
RVI_1



RVI_2



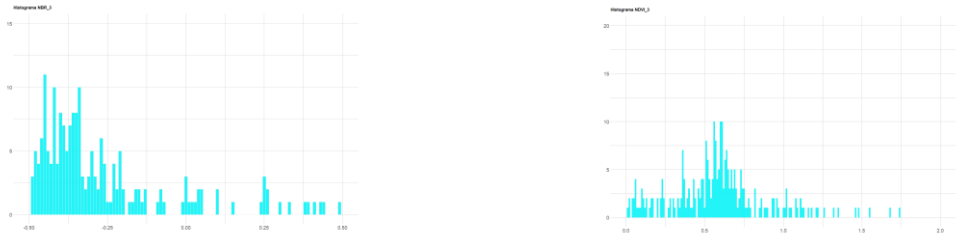
RVI_3



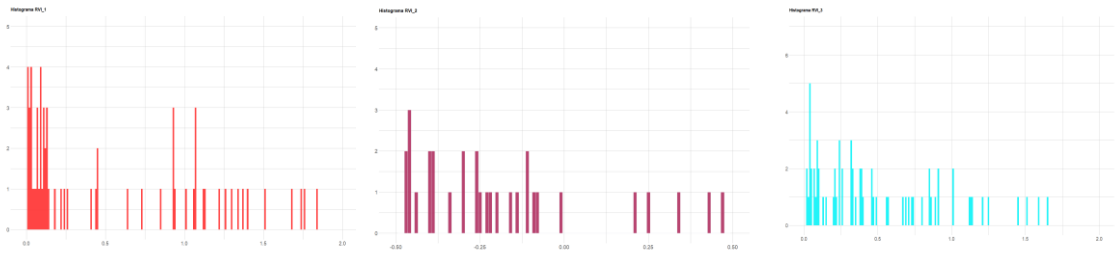
MSI_1 MSI_2 MSI_3

NBR_1 NBR_2 NBR_3

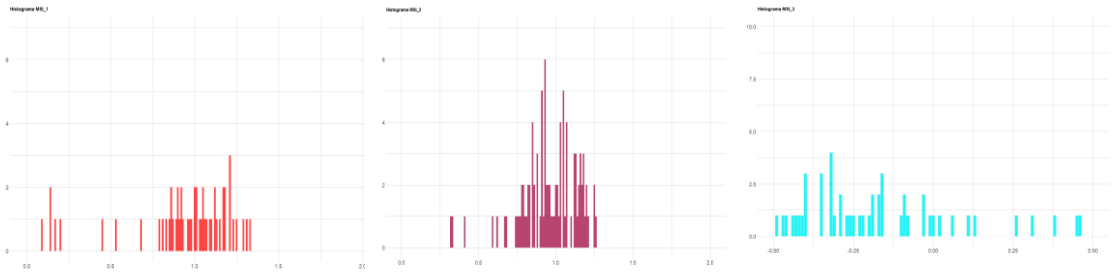
Figura 33. Histogramas de los índices NDVI, RVI, MSI y NBR con datos sin transformar para los tres escenarios. El escenario está indicado de forma numérica (e.j.: NDVI_1 refiere a los valores del NDVI para el primer escenario).



NBR_3 NDVI_3

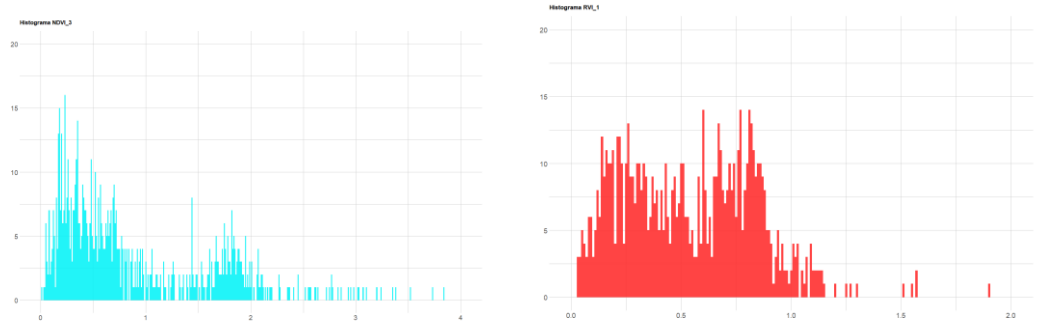


RVI_1 RVI_2 RVI_3

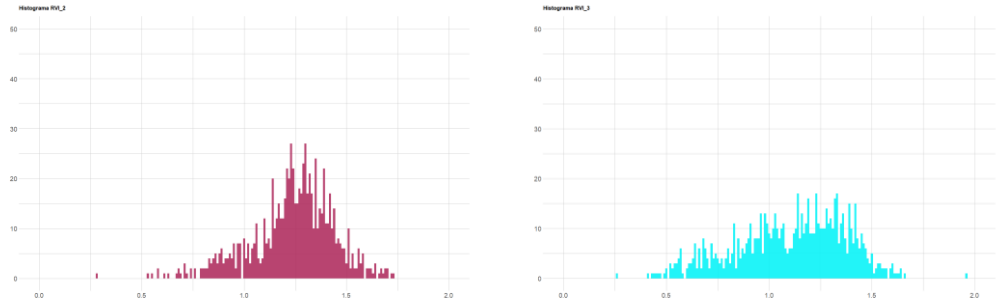


MSI_1 MSI_2 MSI_3

Figura 34. Selección de histogramas de los índices NDVI, RVI, MSI y NBR con datos transformados a logaritmo para escenarios seleccionados. El escenario está indicado de forma numérica (e.j.: NDVI_1 refiere a los valores del NDVI para el primer escenario).



NDVI_3 RVI_1



RVI_2 RVI_3

Figura 35. Selección de histogramas de los índices NDVI, RVI, MSI y NBR con datos transformados a raíz cuadrada para escenarios seleccionados. El escenario está indicado de forma numérica (e.j.: NDVI_1 refiere a los valores del NDVI para el primer escenario).

Tabla 5. Valores del test de Shapiro Wilk

INDICE	P-VALOR
NDVI_1	4.00E-12
NDVI_2	4.95E-26
NDVI_3	9.67E-42
RVI_1	5.80E-49
RVI_2	5.90E-50
RVI_3	9.13E-48
MSI_1	5.22E-41
MSI_2	1.40E-39
MSI_3	5.22E-44
NBR_1	1.75E-17
NBR_2	4.65E-23
NBR_3	1.96E-46

4.3 Diferencias de las variables de Kruskall Wallis

Realizada la prueba de Kruskal Wallis (tabla 6) observamos que existen diferencias estadísticamente significativas entre la mediana de las clases de defoliación para las variables NBR y NDVI del escenario 1. Ello es debido a que el p-valor de dichas variables es inferior a 0.05.

Tabla 6. Variables que muestran diferencias estadísticamente significativas en el test de Kruskall Wallis

Variable	P-valor
NDVI (escenario 1)	8.540 e-05
NBR (escenario 1)	0.000415

4.4 Interpretación de los resultados del test de Dunn

En las tablas 7 y 8 se muestran los valores que hemos obtenido en nuestro test de Dunn para las variables que mostraron diferencias estadísticamente significativas en el test de Kruskall Wallis (NDVI y NBR del escenario 1). Para el caso del índice NDVI del escenario 1 y con una probabilidad del 95%, las clases 0 (defoliación baja) y 1 (defoliación media) son las que muestran diferencias estadísticamente significativas entre sí. Las diferencias no resultan estadísticamente significativas entre las restantes clases ya que tenemos un p-valor de 0.37 entre la clase 0 y la 2 (defoliación alta) y un p-valor de 0.75 entre la clase 1 y la 2 siendo superiores en ambos casos a 0.05.

En nuestro índice NBR del escenario 1 y con una probabilidad del 95%, apreciamos como, a diferencia del anterior, aquí tenemos dos comparaciones cuyo p-valor es inferior a 0.05, esta son las clases (0 - 1) y (0 – 2) que resultan ser diferentes entre sí.

Las clases (1 – 2) tanto en el caso del NDVI como en NBR (escenario 1) presentan valores mayores al p-valor de 0.05 indicando que no hay diferencias estadísticamente significativas entre la defoliación media y la defoliación alta para los años y especies analizados.

Tabla 7. Valores obtenidos en el test de Dunn para NDVI (escenario 1)

Comparación	z	P.unadj	P.adj
0 - 1	3.7763	0.0001	0.0004
0 - 2	1.3222	0.1861	0.3723
1 - 2	-0.3100	0.7564	0.7564

Tabla 8. Valores obtenidos en el test de Dunn para NBR (escenario 1)

Comparación	z	P.unadj	P.adj
0 - 1	-4.0706	4.6881 e-05	0.0001
0 - 2	-2.6458	8.1493 e-03	0.0162
1 - 2	-0.9577	3.3817 e-0.1	0.3381

4.5 Interpretación del diagrama de caja y bigotes

Esta gráfica muestra en el eje X la clase de defoliación (defoliación baja, media o alta) y en el eje Y nos muestra el valor de los índices espectrales que presentan diferencias estadísticamente significativas en el test de Kruskall Wallis y test de Dunn datos.

En la figura 36 y en las tablas 9 y 10 vemos el diagrama del índice NDVI para el escenario 1 en el que a primera vista nos llama la atención el tamaño de la caja gris (correspondiente a la clase 0), su gran tamaño se debe a que los datos en la clase 0 son bastantes dispersos ya que su rango entre el Q_1 y el Q_3 es bastante amplio. Si nos fijamos en las medias, vemos como las de las clases 1 (0.03) y 2 (0.05) presentan valores similares. Al contrario que en las clases 1-2, la media de la clase 0 es superior al de las otras dos, teniendo un valor cercano al 0.1. Este análisis reafirma nuestro test de Dunn que nos indica que las clases 0-1 son significativamente diferentes.

También podemos observar como en las tres cajas la media no se sitúa en el medio, sino que esta se sitúa en la mitad inferior de las cajas, esto nos quiere decir que encontramos una mayor cantidad de datos en la parte media baja de cada clase, haciendo que la media baje y por ende que la media se visualice en esta parte inferior. Es decir que el rango de valores en la parte inferior de la caja es más pequeño que el superior, ya que, si la media se encontrase justo en el medio, la mitad de los datos estarían en medio.

En la figura 37 vemos el diagrama de cajas del índice NBR para el escenario 1 y en comparación al anterior vemos como la dispersión de sus datos en cada una de sus

categorías es menor, ya que el tamaño de las cajas es más estrecho. Esta disminución del tamaño se debe a que los valores se encuentras más concentrados.

Sin embargo, en el anterior ejemplo apreciábamos muy bien la similitud y diferencias de cada una de las categorías fijándonos en la diferencia respecto a sus medianas. En el caso del NBR para el escenario 1 a simple vista no podemos decir que las clases 0-1 y 1-2 son diferentes, sino que tenemos que basarnos en los resultados del test de Dunn para poder decir qué clases muestran diferencias estadísticamente significativas entre sí.

Fijándonos en las medianas de este segundo caso se observa que el valor de la mediana de la clase 0 es de -0.126 y el de la clase 1 es -0.072, con una diferencia entre ambas clases de 0.054. Por su parte, la diferencia entre la clase 1 (-0.072) y la clase 2 (-0.039) es de 0.033. Hay una mayor similitud entre las clases 1-2, mientras que las clases 0-1 son ligeramente distintas sin olvidarnos de que las clases 0-2 son las que mayor diferencia tienen entre sí algo que también se manifiesta en los resultados del test de Dunn (tablas 7 y 8).

Como apreciación, en los dos diagramas vemos como la clase 0 es la que mayor dispersión tiene. Además, también observamos como en los dos diagramas, las medianas tienden a estar próximas al valor 0, es decir que los valores se agrupan en una mayor proporción a este valor cero. El índice NDVI del escenario 1 presenta el valor de las medias en la parte inferior de la caja mientras que la media del índice NBR del escenario 1 se localiza la parte superior de la caja.

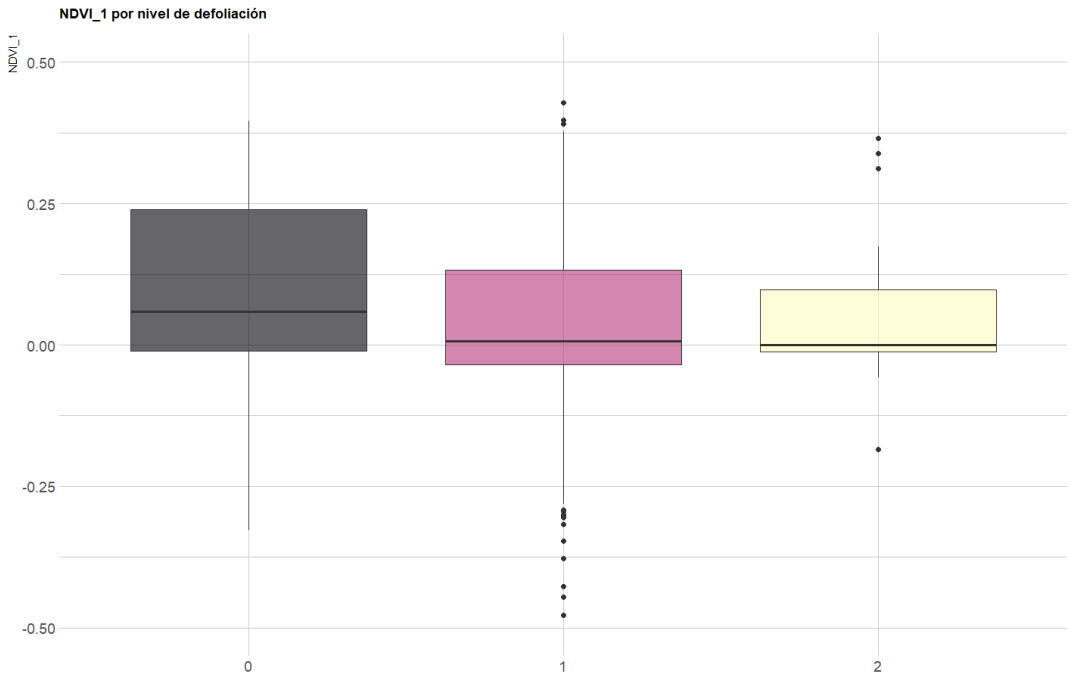


Figura 36. Diagrama de caja del índice NDVI para el escenario 1

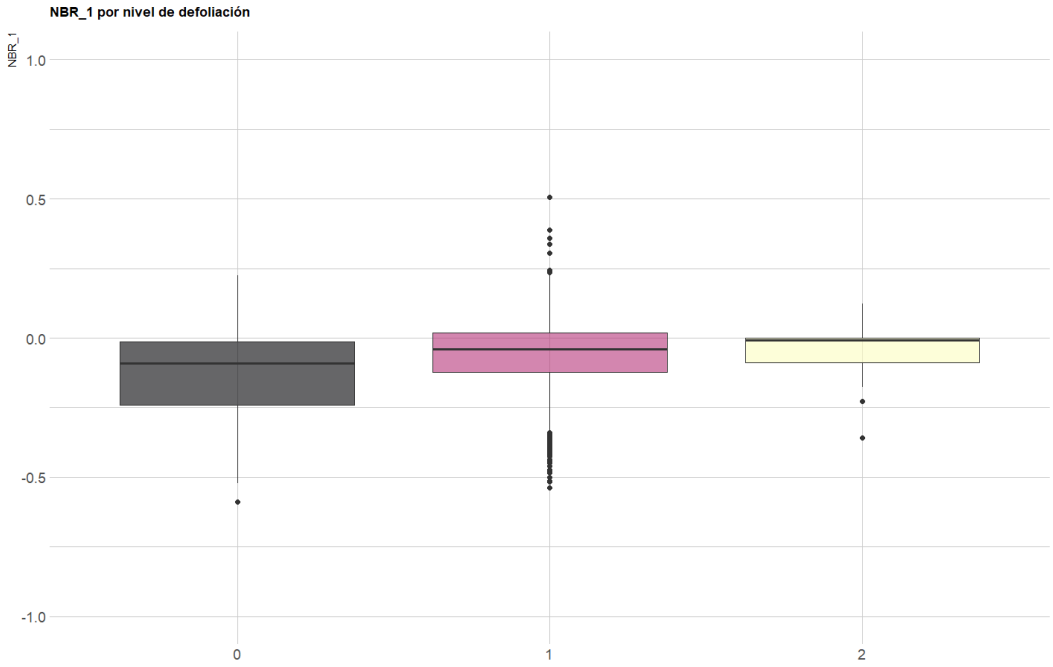


Figura 37. Diagrama de caja del índice NBR para el escenario 1

Tabla 9. Defoliación media índice NDVI para el escenario 1

Clases de defoliación	NDVI
0	0.088
1	0.036
2	0.052

Tabla 10. Defoliación media índice NBR para el escenario 1

Clases de defoliación	NBR
0	-0.126
1	-0.072
2	-0.039

5. DISCUSIÓN

5.DISCUSIÓN

En este estudio hemos podido comprobar la utilidad de la información derivada de teledetección para caracterizar las defoliaciones por procesionaria en pinares de Castilla y León.

Viendo las diferentes tablas del apartado (4.1 Determinación de las clases de defoliación en base a los histogramas de defoliación por especie) que muestran los valores de defoliación por año de cada especie, vemos que *P. pinaster* es la especie cuyo valor promedio de defoliación al cabo de los años es el más elevado. Estos resultados difieren de trabajos previos que reconocen como *P.nigra* es la especie más susceptible a la infestación de estos defoliadores (Sangüesa-Barreda et al., 2014; Hodar et al., 2012). Como se ha mencionado anteriormente, contamos con un tamaño pequeño de muestra, dos parcelas, de *P. nigra* en nuestro estudio lo que implica no poder hacer comparaciones directas con otros estudios para esta especie. *P. pinea* también es considerada una especie resistente a la procesionaria (Hodar et al., 2012) obteniendo en nuestro estudio medias de en torno al 25% algo superiores a la infestación encontrada en *P. sylvestris* con en torno a 24% de defoliación media entre 2002 y 2020.

Una vez observada la incidencia de este fenómeno sobre las especies en las parcelas seleccionadas, se han determinado tres clases o categorías de defoliación: defoliación baja (clase 0), defoliación media (clase 1) y defoliación alta (clase 2) determinando como umbrales de defoliación: <20%; 20-40% >40%. En nuestro proyecto predomina la clase 0, algo recurrente dado que las masas forestales suelen tener en su mayoría una salud forestal óptima, como podemos ver en las figuras 28 y 29 donde la mayoría de nuestros datos se agrupan en esta clase. Esto también se observa en la cartografía que nos proporciona la distribución espacial de las diferentes clases. El uso de clases o niveles de defoliación es una aproximación previamente utilizada en la literatura científica que se puede determinar en base a los valores de defoliación observados, al número de bolsones, entre otros.

El número de clases varía entre estudios. Por ejemplo, Domingo et al., (2024) diferenciaron dos clases: no defoliados con nieles de defoliación menores a 15% y defoliados para los valores más altos, concluyendo que un umbral del 20% sería el óptimo para reconocer árboles defoliados. Sin embargo, Cardil et al., (2019) distinguió tres clases de defoliación denominadas: árboles no defoliados, parcialmente defoliados y completamente defoliados al presentar una defoliación (< 15%, entre 15% y 85%, y > 85%).

Las pruebas o tests de Kruskall Wallis (Tabla 6) y el test de Dunn (Tabla 7 y 8) nos indican que el primer escenario, que establece la diferencia entre la primavera del año biológico en curso y el otoño del año biológico en curso, es el óptimo de los tres analizados porque permite diferenciar entre las clases de defoliación establecidas. Los análisis de varianza también nos indican cuales son los índices más importantes o representativos para nuestro estudio, y en este caso son el NBR y NDVI.

Comparando nuestros resultados con los de estudios previos vemos como el índice NDVI resulta ser de interés para caracterizar el vigor vegetal (DeBeurs y Townsend, 2008; Wang et al., 2012; Meigs et al., 2011). Sin embargo, el índice MSI, no resulta ser relevante en nuestro estudio pese a que hay estudios que determinan que es incluso más relevante que el NDVI (Rullán Silva 2019). El índice NBR no suele ser tan común entre estos estudios, pero sí que se ha tenido en cuenta previamente para estimar la defoliación (Sangüesa-Barreda et al., 2014).

La teledetección es una herramienta de gran utilidad para el seguimiento de las plagas forestales ya que permite determinar los brotes de insectos en grandes áreas a escala espacial y temporal de detalle (McDowell et al., 2015; Trumbore et al., 2015). Además, permite identificar cambios en la cobertura forestal y la cantidad foliar permitiendo una detección temprana y un monitoreo continuo.

6.CONCLUSIÓN

6.CONCLUSIONES

En el presente trabajo se ha demostrado la capacidad de la teledetección para detectar la defoliación producida por la procesionaria en los pinares de Castilla y podemos concluir que:

- Entre las especies consideradas, la especie que ha presentado mayores valores de defoliación media es *P. pinaster* con un porcentaje del 26.12%. *P. nigra* y *P. pinea* mostraron valores medios próximos al 25%, mientras que *P. sylvestris* ha presentado el promedio más bajo con un 23.74%.
- Los índices de vegetación NDVI y NBR han demostrado ser eficaces para el seguimiento y análisis de los impactos de la procesionaria en los pinares de Castilla y León presentando diferencias estadísticamente significativas entre las clases de defoliación según el test de Kruskal Wallis.
- El escenario 1 basado en las diferencias espectrales entre primavera y otoño es óptimo para la determinación de niveles de defoliación usando los índices espectrales NDVI y NBR.
- Las clases defoliación baja y defoliación media, tanto en el índice NDVI como en el NBR, son aquellas que muestran diferencias estadísticamente significativas según el test de Dunn. Además, el índice NBR muestra diferencias estadísticamente significativas entre las clases defoliación baja y alta.

Los resultados obtenidos en este estudio indican que la implementación de técnicas de teledetección nos permite realizar el seguimiento, a gran escala y a medio plazo, de los bosques. Además, nos ofrecen una visión temporal y espacial sobre los patrones de defoliación en distintas masas de pino proporcionando información de interés para una gestión sostenible de las masas forestales.

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Battisti, A., Stastny, M., Netherer, S., Robinet, C., Schopf, A., Roques, A., & Larsson, S. (2005). Expansión del área de distribución geográfica de la polilla procesionaria del pino causada por el aumento de las temperaturas invernales. Aplicaciones ecológicas: una publicación de la Sociedad Ecológica de América, 15(6), 2084–2096. https://doi.org/10.1890/04-1903

Bouhot-Delduc, L. 2005. La gradación de la oruga procesionaria del pino alcanzó su punto máximo en la costa atlántica durante el invierno de 2003-2004. Informe sobre la salud de los bosques 2004. Disponible en http://agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/procession

Bourougaaoui, A., Robinet, C., Ben Jamaa, M. L., & Laparie, M. (2021). Efectos del calentamiento climático en la procesionaria del pino en el extremo sur de su área de distribución: un análisis retrospectivo sobre la supervivencia de los huevos en Túnez. En bioRxiv (p. 2021.08.17.456665). https://doi.org/10.1101/2021.08.17.456665

Buffo, E., Battisti, A., Stastny, M., & Larsson, S. (2007). La temperatura como predictor de supervivencia de la procesionaria del pino en los Alpes italianos. Entomología Agrícola y Forestal, 9(1), 65–72. https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2006.00321.x

Cardil, A., Otsu, K., Pla, M., Silva, C. A., & Brotons, L. (2019). Quantifying pine processionary moth defoliation in a pine-oak mixed forest using unmanned aerial systems and multispectral imagery. PloS One, 14(3), e0213027. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213027

Debeurs, K., & Townsend, P. (2008). Estimating the effect of gypsy moth defoliation using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, *112*(10), 3983–3990. https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.07.008

Démolin, G. (1969). Comportamiento adulto de Thaumetopoea pityocampaSchiff. Dispersión espacial, importancia ecológica. Anales de Ciencias Forestales, 26(1), 81–102. https://doi.org/10.1051/forest/19690104

Domingo, D., Gómez, C., Mauro, F., Houdas, H., Sangüesa-Barreda, G., & Rodríguez-Puerta, F. (2024). Canopy structural changes in Black Pine trees affected by pine processionary moth using drone-derived data. Drones, 8(3), 75. https://doi.org/10.3390/drones8030075

Domingo, D., Vicente-Serrano, S. M., Gómez, C., Olano, J. M., & Sangüesa-Barreda, G. (2024). Summer heat waves could counterbalance the increasing incidence of pine processionary due to warmer winters in Mediterranean pine forests. *Forest Ecology and Management*, *555*(121695), 121695. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121695

Gazol, A., & Camarero, J. J. (2022). Compound climate events increase tree drought mortality across European forests. The Science of the Total Environment, 816(151604), 151604. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151604

Gazol, A., Hernández-Alonso, R., & Camarero, J. J. (2019). Patterns and drivers of pine processionary moth defoliation in Mediterranean mountain forests. *Frontiers in ecology and evolution*, *7*. https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00458

Hódar, J. A., Zamora, R., & Cayuela, L. (2012). Cambio climático y plagas: algo más que el clima. *Ecosistemas: revista cientifica y tecnica de ecologia y medio ambiente*, *21*(3), 73–78. https://doi.org/10.7818/ecos.2012.21-3.09

Hódar, José A., Zamora, R., & Castro, J. (2002). Utilización del hospedador por polilla, supervivencia larvaria y polilla, de la oruga procesionaria del pino Thaumetopoea pityocampa en relación con la calidad del alimento en tres especies de Pinus. Entomología Ecológica, 27(3), 292–301. https://doi.org/10.1046/j.1365-2311.2002.00415.x

Huchon, H., & Demolin, G. (1970). La bioecología de la procesionaria del pino: dispersión potencial, dispersión actual. Revista Forestal Francesa, S, 220. https://doi.org/10.4267/2042/20421

Índice Normalizado de Área Quemada (NBR). Recuperado el 4 de junio de 2024, de https://www.un-spider.org/es/node/10959

Kriticos, D. J., Leriche, A., Palmer, D. J., Cook, D. C., Brockerhoff, E. G., Stephens, A. E. A., & Watt, M. S. (2013). Linking climate suitability, spread rates and host-impact when estimating the potential costs of invasive pests. *PloS One*, *8* (2), e54861. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054861

Kurz, W., Dymond, C., Stinson, G. et al. El escarabajo del pino de montaña y el carbono de los bosques se relacionan con el cambio climático. Nature 452, 987–990 (2008). https://doi.org/10.1038/nature06777

La Red Europea de Daños en los Bosques, Nivel I. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado el 15 de mayo de 2024, de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques/red_nivel_I_danos.html

La Red Europea de Daños en los Bosques, Nivel II. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado el 15 de mayo de 2024, de https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/manual_red_nivel_2_completo_tcm30-155458.pdf

McDowell, N.G., Coops, N.C., Beck, P.S., Chambers, J.Q., Gangodagamage, C., Hicke, J.A., et al. (2015). Global satellite monitoring of climate-induced vegetation disturbances. Trends Plant Sci. 20 (2), 114–123

Meigs, G. W., Kennedy, R. E., & Cohen, W. B. (2011). A Landsat time series approach to characterize bark beetle and defoliator impacts on tree mortality and surface fuels in conifer forests. Remote Sensing of Environment, 115(12), 3707–3718. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.009

Moisture Stress Index (MSI). Recuperado el 5 de junio de 2024, de https://geonetwork.swissdatacube.org/geonetwork/srv/api/records/6040f1ec-e4b8-4080-811c-a1e4590540ee

Pettorelli, N., Vik, J. O., Mysterud, A., Gaillard, J.-M., Tucker, C. J., & Stenseth, N. C. (2005). Utilizar el NDVI derivado de satélites para evaluar las respuestas ecológicas al cambio ambiental. Tendencias en Ecología y Evolución, 20(9), 503–510. https://doi.org/10.1016/j.tree.

Red de seguimiento intensivo - Nivel II. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico. Recuperado el 15 de mayo de 2024, de https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/temas/inventarios-nacionales/redes-europeas-seguimiento-bosques/red_nivel_II_danos.html

Robinet, C., Rousselet, J., & Roques, A. (2014). Posible propagación de la procesionaria del pino en Francia: resultados preliminares de un modelo de simulación y retos futuros. Anales de Ciencias Forestales, 71(2), 149–160. https://doi.org/10.1007/s13595-013-0287-7

Rocha, S., Kerdelhué, C., Ben Jamaa, M. L., Dhahri, S., Burban, C., & Branco, M. (2017). Efecto de las olas de calor sobre la mortalidad embrionaria en la procesionaria del pino. Boletín de Investigación Entomológica, 107(5), 583–591. https://doi.org/10.1017/s0007485317000104

Roques, A., Auger-Rozenberg, M.-A., & Boivin, S. (2006). La falta de congéneres autóctonos puede limitar la colonización de coníferas introducidas por insectos autóctonos en Europa. Revista Canadiense de Investigación Forestal, 36(2), 299–313. https://doi.org/10.1139/x05-277

Rullán Silva, C. D. (2019). Aplicación de la teledetección satelital en el seguimiento de la defoliación por insectos forestales. Universidad de Valladolid.

Sangüesa-Barreda, G., Camarero, J. J., García-Martín, A., Hernández, R., & de la Riva, J. (2014). Remote-sensing and tree-ring based characterization of forest defoliation and growth loss due to the Mediterranean pine processionary moth. *Forest Ecology and Management*, *320*, 171–181. https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.008

Santos, H., Burban, C., Rousselet, J., Rossi, J.-P., Branco, M., & Kerdelhué, C. (2011). Incipient allochronic speciation in the pine processionary moth (Thaumetopoea pityocampa, Lepidoptera, Notodontidae): Allochronic speciation in the PPM. Journal of Evolutionary Biology, 24(1), 146–158. https://doi.org/10.1111/j.1420-9101.2010.02147.x

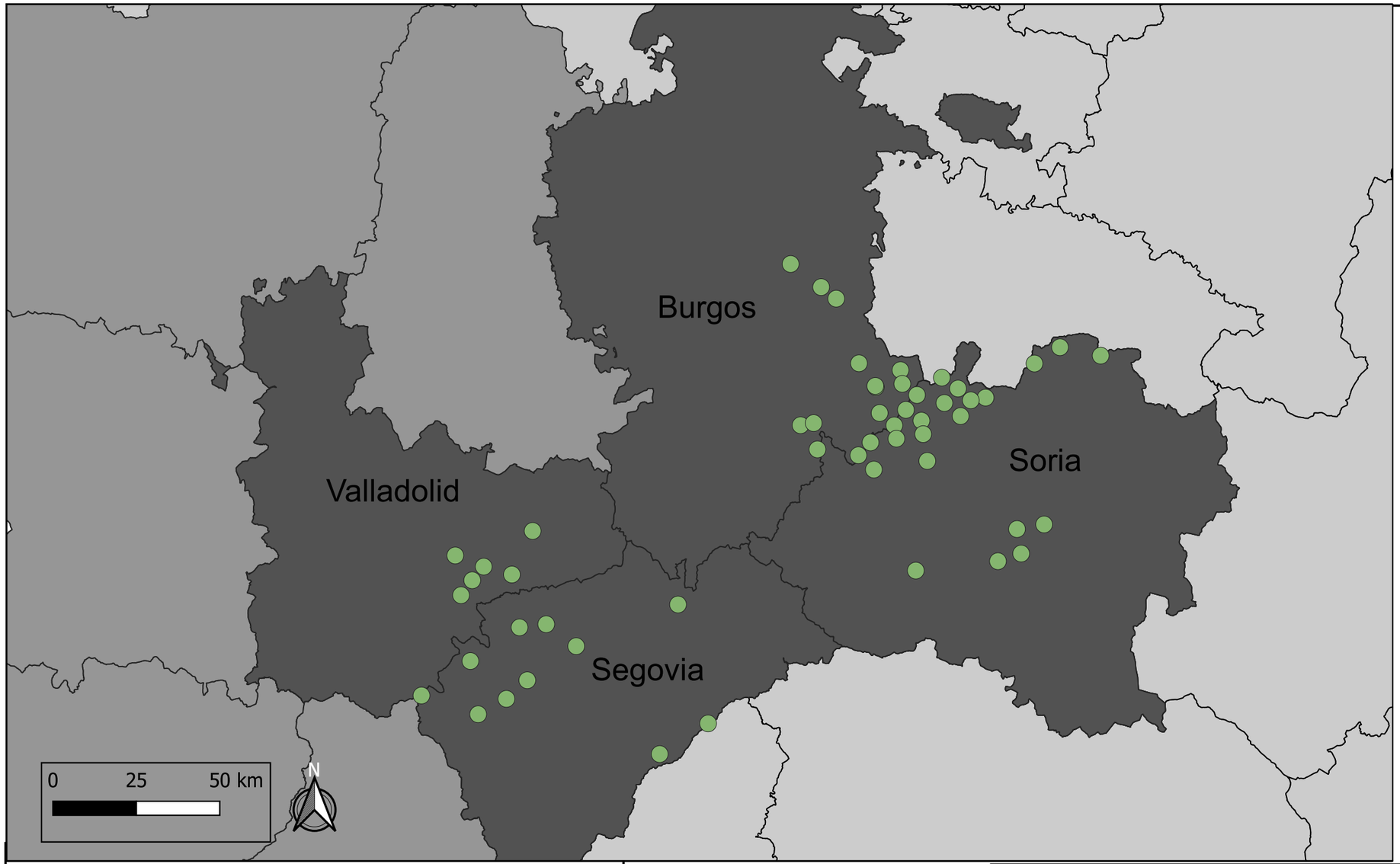
Seidl, R., Schelhaas, MJ., Rammer, W. et al. Aumento de las perturbaciones forestales en Europa y su impacto en el almacenamiento de carbono. Nature Clim Change 4, 806–810 (2014). https://doi.org/10.1038/nclimate2318

Trumbore, S., Brando, P., & Hartmann, H. (2015). Forest health and global change. Science (New York, N.Y.), 349(6250), 814–818. https://doi.org/10.1126/science.aac6759

Wang, D., Morton, D., Masek, J., Wu, A., Nagol, J., Xiong, X., Levy, R., Vermote, E., & Wolfe, R. (2012). Impact of sensor degradation on the MODIS NDVI time series. Remote Sensing of Environment, 119, 55–61. https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.12.001

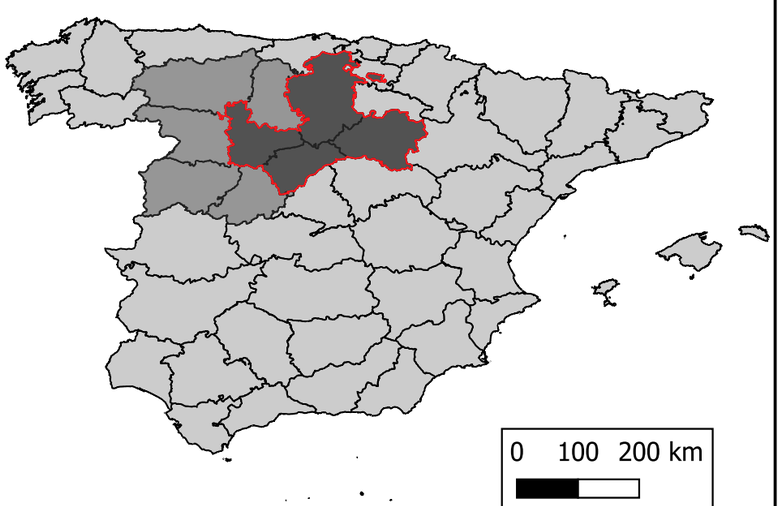
Welikhe, P., Quansah, J. E., Fall, S., & McElhenney, W. (2017). Estimación del porcentaje de humedad del suelo utilizando el índice de estrés hídrico basado en LANDSAT. J. Remote Sens. GIS, 6(2).

8. PLANOS



LEYENDA

- España
- Provincias que incluyen las parcelas
- Zona de observación
- Parcelas



U.V.A.–E. I. FORESTAL, AGRONÓMICA Y DE LA BIOENERGÍA
GRADO EN INGENIERÍA FORESTAL:INDUSTRIAS FORESTALES
PROMOTOR:ADRIÁN CARPINTERO BLASCO

TÍTULO: Reconstrucción de las infestaciones por procesionaria mediante técnicas de teledetección

LOCALIZACIÓN: Castilla y León

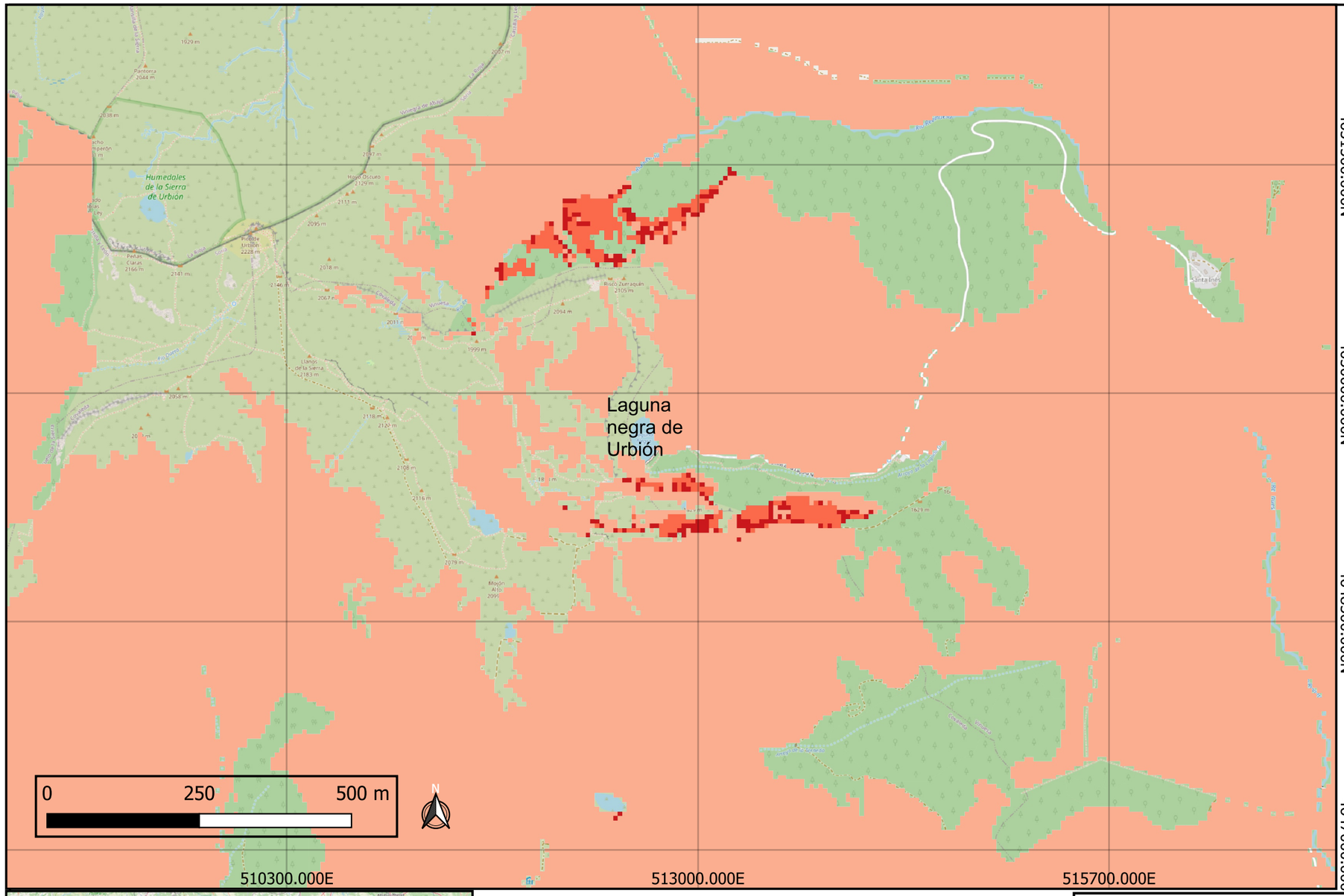
ESCALA: 1:1.400.000
1:6.750.000

FECHA:21/06/2024
FIRMA:

ALUMNO: ADRIÁN CARPINTERO

DENOMINACIÓN: Mapa de localización

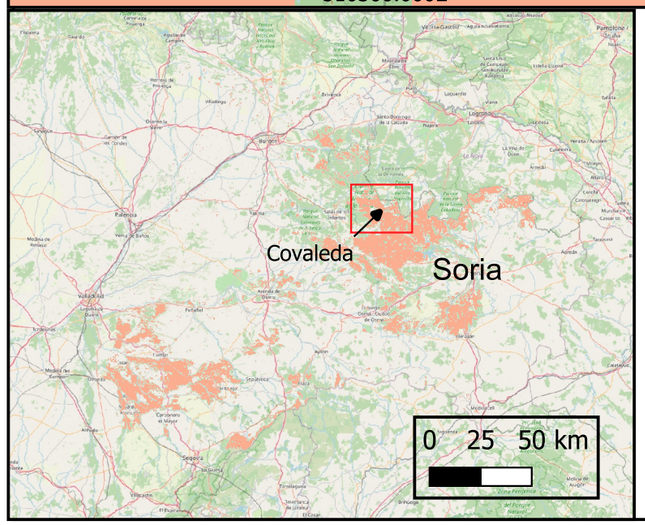
PLANO Nº: P1



LEYENDA

Calses de defoliación según indice NDVI

- Clase 0 (Defoliación baja)
- Clase 1 (Defoliación media)
- Clase 2 (Defoliación alta)



U.V.A.–E. I. FORESTAL, AGRONÓMICA Y DE LA BIOENERGÍA
GRADO EN INGENIERÍA FORESTAL:INDUSTRIAS FORESTALES
PROMOTOR: Adrián Carpintero Blasco

TÍTULO:
Reconstrucción de las infestaciones por procesionaria mediante técnicas de teledetección

LOCALIZACIÓN:
Castilla y León

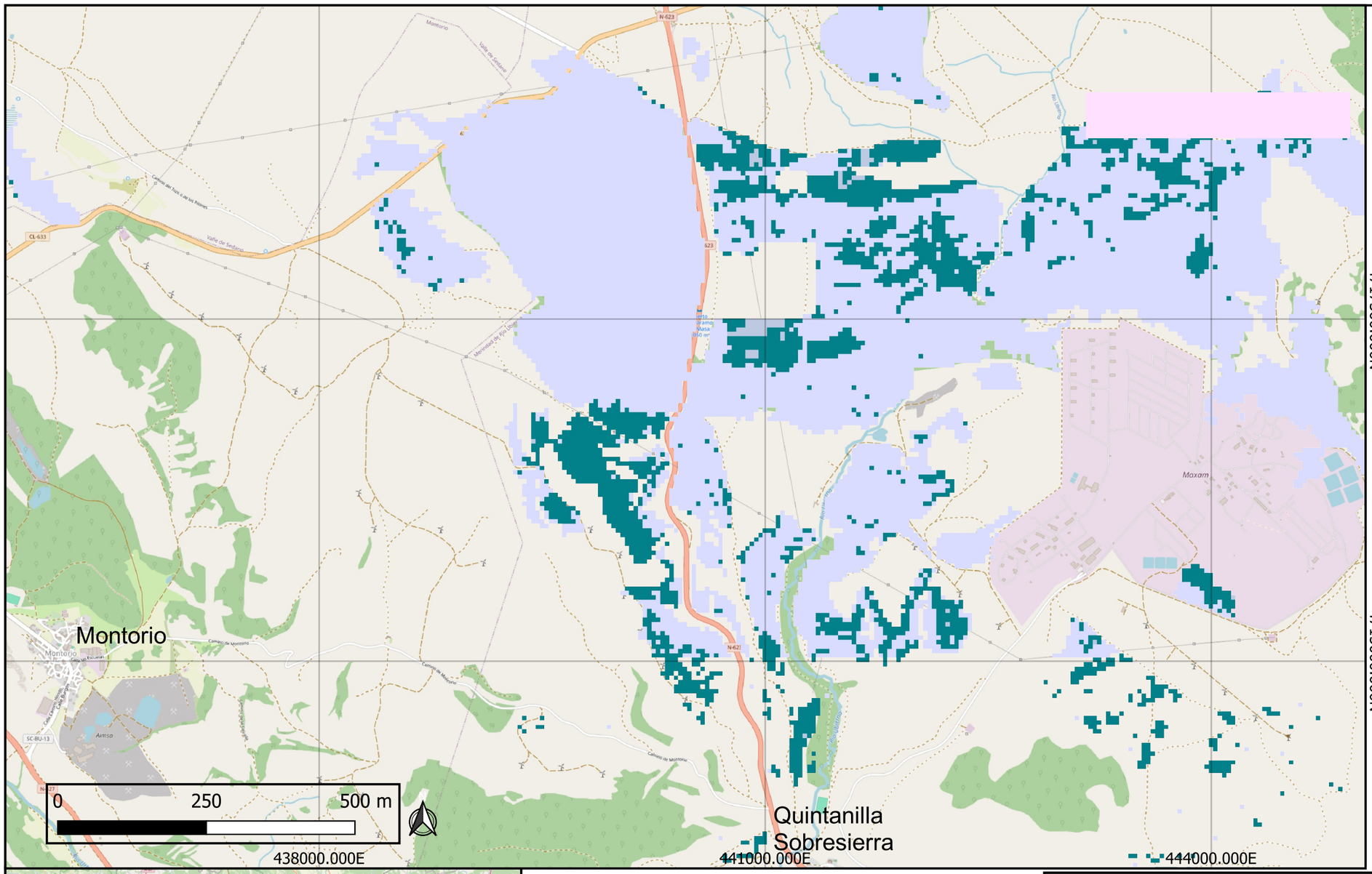
ESCALA:
1:30.000
1:300.000

FECHA: 21/06/2024
FIRMA:

ALUMNO: ADRIÁN CARPINTERO

DENOMINACIÓN:
Clases de defoliación en el año 2016 determinadas mediante NDVI derivado de imágenes Landsat

PLANO Nº:
P2



LEYENDA

Clases de defoliación según índice NBR

- Clase 0 (Defoliación baja)
- Clase 1 (Defolaición media)
- Clase 2 (Defoliación alta)

U.V.A.–E. I. FORESTAL, AGRONÓMICA Y DE LA BIOENERGÍA
GRADO EN INGENIERÍA FORESTAL:INDUSTRIAS FORESTALES

PROMOTOR: Adrián Carpintero Blasco

TÍTULO:

Reconstrucción de las infestaciones por procesionaria mediante técnicas de teledetección

LOCALIZACIÓN:	ESCALA:
Castilla y León	1:30.000 1:300.000

FECHA: 21/06/2024 FIRMA: ALUMNO: ADRIÁN CARPINTERO	DENOMINACIÓN: Clases de defoliación en el año 2016 determinadas mediante NBR derivado de imágenes Landsat	PLANO Nº: P3