

TRABAJO FIN DE MÁSTER

DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE VEGETACIÓN AFECTADAS POR FENÓMENOS METEOROLÓGICOS EXTREMOS MEDIANTE TÉCNICAS DE TELEDETECCIÓN: EL CASO DE LA SERRA DE TRAMUNTANA

Carlos Alonso Merino

***Directores: Martín de Luís Arrillaga
Luís Alberto Longares Aladrén***

**Máster Universitario en
Tecnologías de la Información Geográfica para la Ordenación del
Territorio: Sistemas de Información Geográfica y Teledetección**

Noviembre de 2021



**Universidad
Zaragoza**

**Departamento de Geografía
y Ordenación del Territorio**



Resumen

El presente trabajo tiene como objetivo la identificación de las zonas de vegetación afectadas por un evento meteorológico extremo mediante técnicas de teledetección. El evento analizado sucedió el día 29 de agosto de 2020 y afectó a los municipios de Banyalbufar, Esporles y Valldemossa, ubicados en la Serra de Tramuntana (Mallorca). El fenómeno consistió en una sucesión de un tornado y un reventón o "downburst" que afectó de manera desigual a la vegetación de la zona. La metodología aplicada ha consistido en la toma de muestras de la vegetación afectada de la zona de estudio para después ser analizada cualitativamente mediante el uso de índices de vegetación, así como, un análisis de varianza (ANOVA) a partir de los valores de reflectividad procedentes de imágenes de satélite. Con todo ello, se ha llevado a cabo una estratificación de los grados de afección sobre la vegetación derivados del fenómeno meteorológico acaecido. De los resultados obtenidos se ha extraído que el índice óptimo para medir la afección es el componente de humedad de Tasseled Cap.

Palabras Clave: *Vegetación, afección, teledetección, meteorología extrema, Serra de Tramuntana.*

Abstract

The objective of this study is to identify the vegetation zones affected by an extreme meteorological event using remote sensing techniques. The event analyzed took place on August 29, 2020 and affected the municipalities of Banyalbufar, Esporles and Valldemossa, located in Serra de Tramuntana (Mallorca). The phenomenon consisted of a succession of a tornado and a downburst that affected the vegetation in the area unevenly. The applied methodology consisted of taking samples of the affected vegetation in the study area to later be analyzed qualitatively through the use of vegetation indices, as well as an analysis of variance (ANOVA) from the reflectivity values from of satellite images. With all this, a stratification of the degrees of affection on the vegetation derived from the meteorological phenomenon has been carried out. From the results obtained, it has been extracted that the optimal index to measure the condition is the humidity component of Tasseled Cap.

Key Words: *vegetation, affection, remote sensing, extreme weather, Serra de Tramuntana.*

Agradecimientos

Me gustaría agradecer de manera muy sincera a todas aquellas personas que han hecho posible que fuera capaz de realizar este trabajo:

A mis amigos y mi familia, que tanto me han apoyado y animado para conseguirlo.

Al Servei de Gestió Forestal de les Illes Balears, por proporcionarme información de manera desinteresada.

Y a mis profesores Martín De Luís Arrillaga y a Fernando Pérez Cabello, por la dedicación, colaboración y gran ayuda prestada para sacar el trabajo adelante.

Índice

1. Introducción	7
1.1. Justificación	7
1.2. Antecedentes	8
1.3. Objetivos	10
1.4. Contexto geográfico.....	10
1.4.1. Área de estudio	10
1.4.2. Geología y climatología	11
1.4.3. Vegetación y usos del suelo	13
2. Metodología	18
2.1. Categorización de la vegetación afectada y digitalización de polígonos.....	18
2.2. Extracción de valores de reflectividad de imágenes Sentinel-2 mediante GEE	19
2.3. Cálculo de índices de la vegetación	20
2.3.1. NDVI.....	20
2.3.2. SAVI.....	21
2.3.3. NBRi.....	21
2.3.4. CCCI.....	22
2.3.5. SLAVI	22
2.3.6. Tasseled Cap.....	22
2.4. Comprobación de los datos y análisis ANOVA	23
3. Resultados	24
3.1. Resultado de los índices de vegetación y validación de los datos	24
3.2. Interpretación de los datos obtenidos.....	24
3.2.1. NDVI.....	24
3.2.2. SAVI	25
3.2.3. NBRi	26
3.2.4. CCCI	27
3.2.5. SLAVI.....	28
3.2.6. Tasseled Cap: GVI-MSS.....	29
3.2.7. Tasseled Cap: GVI	30
3.2.8. Tasseled Cap: WET.....	31
4. Discusiones y conclusiones.....	33
5. Bibliografía	35
6. Anejo	39

Índice de figuras

Figura 1: Mapa de localización del área de estudio.	11
Figura 3: Climograma del puerto de Palma.....	13
Figura 4: Mapa de cobertura de usos del suelo	16
Figura 5: Mapa de localización de las muestras tomadas sobre el estado de la vegetación.....	19
Figura 6: Evolución NDVI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021	25
Figura 7: Evolución SAVI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021	26
Figura 8: Evolución NBRi entre el 05/08/2020 y 06/07/2021	27
Figura 9: Evolución CCCI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021	28
Figura 10: Evolución SLAVI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021	29
Figura 11: Evolución GVI-MSS entre el 05/08/2020 y 06/07/2021	30
Figura 12: Evolución GVI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021.....	31
Figura 13: Evolución WET entre el 05/08/2020 y 06/07/2021	32

Índice de tablas

Tabla 1: Número de fenómenos registrados en España por período histórico (Gayà, 2011).	9
Tabla 2: Zonas de vegetación de la isla de Mallorca.....	14
Tabla 3: Comunidades vegetales presentes en la isla de Mallorca.	14
Tabla 4: Principales formaciones forestales arboladas de las Islas Baleares por especie y superficie en ha y porcentaje.....	15
Tabla 5: Categorización de la zona de estudio	18
Tabla 6: Fechas válidas para	24
Tabla 7: Datos NDVI por afección y fecha	39
Tabla 8: Datos SAVI por afección y fecha	39
Tabla 9: Datos NBRi por afección y fecha	39
Tabla 10: Datos CCCI por afección y fecha	40
Tabla 11: Datos SLAVI por afección y fecha	40
Tabla 12: Datos GVIMSS por afección y fecha	41
Tabla 13: Datos GVI por afección y fecha	41
Tabla 14: Datos WET por afección y fecha.....	41

Índice de acrónimos

AEMET: Agencia Estatal de Meteorología

ANOVA: Analysis of variance

API: Application Programming Interface

BOIB: Boletín Oficial de las Islas Baleares

IBESTAT: Instituto de Estadística de las Islas Baleares

CAIB: Comunidad Autónoma de las Islas Baleares

CCCI: Canopy Chlorophyll Content Index

GEE: Google Earth Engine

GVI: Green Vegetation Index

LIC: Lugar de Interés Comunitario

MAGRAMA: Ministerio de Agricultura y Pesca, Alimentación y Medio Ambiente

NAS: National Academies of Science

NBRi: Normalized Burn Ratio index

NDVI: Normalized Difference Vegetation Index

NIR: Near InfraRed

PFIB: Plan Forestal de las Islas Baleares

PGDIF: Plan General de Defensa Frente a Incendios Forestales

SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index

SLAVI: Specific Leaf Area Vegetation Index

WET: Wetness

ZEPA: Zona de Especial Protección para Aves

1. Introducción

1.1. Justificación

El 29 de agosto de 2020, los municipios de Banyalbufar, y en menor medida, el de Esporles y Valldemossa, ubicados en el sector suroccidental de la Serra de Tramuntana, en la isla de Mallorca, se vieron afectados por el paso de dos fenómenos meteorológicos extremos: un tornado (comúnmente llamado “cap de fibló” en la isla de Mallorca) y un reventón. Como consecuencia, parte de la cubierta vegetal, sobre todo en el municipio de Banyalbufar, se vio afectada negativamente causando un cambio en el paisaje debido a la destrucción de los árboles en una zona especialmente frondosa.

Un tornado se define como una columna de aire que gira violentamente y se extiende desde la base de una nube de tormenta hasta el suelo. Suele ir asociado a una fuerte actividad tormentosa y es considerado como uno de los fenómenos meteorológicos con más poder destructivo que pueden generarse en la naturaleza con vientos máximos de 400 km/h en los casos más extremos (Whitaker, 1998). Su magnitud se divide en seis categorías, si se emplea la escala Fujita: F0 o tornado débil, F1 o tornado moderado, F2 o tornado importante, F3 tornado severo, F4 o tornado devastador, y F5 o tornado increíble (Fujita, 1981).

Por otra parte, el fenómeno de reventón o “downburst” suele ir ligado con otros eventos como los tornados. Aparecen debido a una breve pero intensa racha de viento que parece irradiar de un punto central del suelo. Es producida por una violenta corriente descendente que se forma en la parte central de una nube de evolución. Se pueden diferenciar entre secas o húmedas, dependiendo de si se producen con condiciones de ausencia de humedad o con precipitación (Rodríguez et al., 2021; Whitaker, 1998)

Estos fenómenos meteorológicos son relativamente frecuentes debido a las características climáticas que imperan en el territorio y se han ido registrando eventos similares tanto en la isla de Mallorca como en el resto del archipiélago en la literatura científica (Homar et al., 2001). El Govern de les Illes Balears cuenta con un Plan Forestal en el cual uno de sus ejes es “Gestión forestal y selvicultura adaptativa de los bosques a los efectos previsibles del cambio climático”. El Plan Forestal de las Islas Baleares es un plan director cuyo objetivo es organizar y regir las políticas forestales del archipiélago balear, en base a las competencias autonómicas, de las áreas forestales y por los terrenos que tienen la condición legal de monte según la normativa forestal estatal.

Sin embargo, como especifica en el mismo texto, el desarrollo normativo balear en materia forestal es muy escaso, prácticamente reducido a incendios forestales, en contraste con las numerosas disposiciones legales aprobadas sobre conservación de especies y espacios naturales.

De hecho, desde 2015, existe el PGDIF (Plan General de Defensa Frente a Incendios Forestales), el cual es un plan elaborado por el entonces MAGRAMA para la CAIB para ayudar a prevenir y a actuar, exclusivamente, contra los incendios forestales en los bosques del archipiélago balear. Actualmente, ya se ha realizado el cuarto estudio. Los objetivos básicos, según reza el PGDIF son:

- Conocer y analizar los incendios históricos.
- Conocer la eficacia del actual dispositivo a través del análisis del territorio.
- Identificar la dinámica natural y la interacción antrópica sobre los diferentes sistemas forestales.
- Analizar la vulnerabilidad del territorio ante un posible incendio.
- Relacionar los anteriores parámetros para cuantificar zonificar el territorio en función del nivel de riesgo.
- Plantear acciones a partir de estos análisis para:
 - Proponer directrices básicas para las acciones de prevención.

- Definir y cuantificar las actuaciones de protección o cuantificarlas, planificarlas y programarlas.
- Fomentar las medidas de autoprotección en las zonas urbanas colindantes.
- Diseñar un SIG como herramienta de gestión preventiva y operativa.
- Estudiar iniciativas de I+D.
- Evaluar la rentabilidad del Plan General.
- Tipificar el alcance y contenido de los Planes de Prevención Comarcales vinculados e integrados en este Plan General.

Sin embargo, el PFIB no contempla ningún tipo específico de actuación frente a posibles eventos meteorológicos extremos como tornados o reventones como sí que lo tiene en cuanto a materia contra incendios. En el escenario actual, en el que cada vez se registran más fenómenos de este tipo y, posiblemente, sean más virulentos, no es descabellado pensar que sea necesario un plan de actuación similar al PFIB para poder homogeneizar y estandarizar una serie de acciones que permitan, al menos, aplicar medidas preventivas y correctoras.

Por ello, debido a la relativa frecuencia de estos eventos extremos, posiblemente cada vez más comunes a causa del cambio climático, y la falta de un plan de actuación claro, da a las técnicas de teledetección una oportunidad para poder ser incluidas y utilizadas para una mejor intervención en las zonas afectadas y, más concretamente, en este caso, delimitar la zona afectada con la técnica y fecha óptima.

1.2. Antecedentes

Los bosques de la cuenca mediterránea están expuestos a una gran cantidad de riesgos y amenazas que pueden poner en jaque su integridad, ya sean estas de origen natural, por efectos derivados del cambio climático, o debido a la mano de la actividad antrópica. (Maestre y Cortina, 2004). Por una parte, el descenso en la cantidad de precipitación, debido tanto al incremento de la aridez y la desertificación, así como al incremento de la temperatura, lo que también daría paso a un mayor riesgo de incendios; por otra parte, los cambios de los usos del suelo, como por ejemplo, en el abandono progresivo de la actividad agrícola de tipo extensivo frente a otros cultivos de índole intensiva, así como una mayor presión derivada del incremento en la urbanización con la consecuente fragmentación del paisaje generan una amenaza para el equilibrio y supervivencia de los bosques (Peñuelas et al., 2017).

La cuenca del Mediterráneo está considerada como un *hotspot* o punto caliente de biodiversidad por la gran cantidad de especies, tanto animales como vegetales que únicamente se encuentran en esta zona del planeta. Esta característica agrega una fragilidad extra a estos ecosistemas, ya que estos están adaptados a unas condiciones específicas y están más expuestos a las posibles distorsiones, fruto de los cambios producidos por agentes externos (Kramer et al., 2000).

Sin embargo, uno de los principales retos a los que se enfrenta este tipo de bosques, además de los comentados anteriormente, son los peligros derivados del cambio climático. Entre los modelos que se barajan para el futuro de la región, se estima que el incremento de la temperatura de la zona de la cuenca mediterránea sea entre 2°C y 4°C a lo largo de este siglo (Resco De Dios et al., 2007). Estos valores, más altos respecto al resto de zonas menos sensibles, ponen en jaque la supervivencia de los bosques. Y, ligado a este hecho, se espera que haya un aumento tanto en la ocurrencia como en la virulencia de los fenómenos meteorológicos extremos. Aunque se especulaba que este incremento

de magnitud y tiempo de retorno de estos eventos no podían ser atribuidos al efecto antropogénico, la NSA ha declarado que no se puede realizar una declaración tan amplia, ya que existen peculiaridades que relacionan la actividad humana con esta nueva tendencia (Stott, 2016).

Pero ¿cómo se puede determinar qué es un fenómeno meteorológico extremo? Se puede considerar como todo aquel evento relacionado con el tiempo atmosférico que sobresale, en cuanto a intensidad, del rango que se supone normal. Es decir, que es infrecuente o raro. Como característica agregada, estos eventos suelen ser de índole destructiva, aunque no siempre tienen porque causar desastres. Por eso, hay que tener en cuenta en qué lugar ocurren los fenómenos, para poder considerarse como extremos (Romm, 2018).

En la región mediterránea, de manera intrínseca, se registran habitualmente eventos extremos como episodios de sequías, relacionadas con la estación de veranos secos, e inundaciones, ligadas a las precipitaciones torrenciales, comunes en estas latitudes. Sin embargo, también existen otro tipo de fenómenos de carácter destructivo que, si bien siempre han estado presentes, cada vez se registran de forma más habitual.

Los tornados y trombas marinas tienen origen en los episodios de tormentas convectivas que de manera más o menos regular afectan a la cuenca mediterránea y ocurren principalmente a finales de verano y en otoño, cuando la superficie del mar registra temperaturas cálidas (Miglietta et al., 2017).

Tabla 1: Número de fenómenos registrados en España por período histórico. Fuente: elaboración propia a partir de Gayà, 2011.

Fenómeno	Antes de 1826	1826	1976–2009
Tornados	40	306	362
Trombas marinas	3	93	313
Reventones	21	404	144

De hecho, si nos centramos en la zona occidental del Mediterráneo, se sabe que las regiones españolas de Cataluña e Illes Balears es donde más tornados se registran (Rodríguez et al., 2021). Más concretamente, el territorio catalán es la comunidad autónoma con mayor número de tornados del estado y se desarrollan de manera más habitual en la zona central del litoral (Gayà et al., 2011).

El archipiélago balear es una región propensa a albergar tanto tornados como trombas marinas, tanto que tienen hasta una terminología propia en el dialecto mallorquín (“cap de fibló”). Muchos de ellos no sobrepasan la categoría F1 en la escala Fujita, que es cómo se catalogan los tornados dependiendo de los daños causados por este (Fujita, 1981), pese a que se han llegado a registrar de categoría F3 (Homar et al., 2001). Un interesante episodio que fue estudiado acaeció entre la noche del 11 y el 12 de septiembre de 1996, en el que se registraron seis tornados a lo largo del archipiélago: uno en Ibiza, dos en Menorca y tres en Mallorca, en el que zonas de pinar y almendros fueron dañados (Homar et al., 2001).

El daño de los tornados en los bosques ha sido documentado en varios estudios realizados por autores como Wegener o Letzman. En ellos se realizó un estudio que sugería que cuando un tornado se movía a través de un bosque, producía un patrón de daño que estaba relacionado con la suma de vientos de vórtice (velocidades radiales y tangenciales) y la velocidad de avance (Blanchard, 2013). Una particularidad que condiciona bastante el daño en las masas forestales es el tamaño de las especies que lo componen. Es un hecho que los árboles de mayor tamaño son los que sufren mayor daño con el paso de un tornado (Peterson, 2000), lo cual resulta interesante tener en cuenta en aras de la planificación y gestión de los bosques frente a estos fenómenos.

Las rachas de vientos derivados de los reventones o “downburst” fruto de episodios tormentosos

convectivos son capaces de provocar la rotura o desarraigo de individuos aislados o grandes grupos de árboles. Además, suelen crear huecos de tamaño variable, a menudo de escala intermedia, que varían entre brechas entre unos pocos individuos, hasta grandes aberturas en el bosque creadas por estos eventos de viento catastrófico (Greenberg & McNab, 1998). Varios estudios realizados en la selva amazónica con el empleo de las imágenes Landsat Thematic Mapper (TM) permiten mostrar los claros en los bosques secundarios. Así, se detectan fácilmente por sus patrones espaciales y sus reflectancias en las diferentes longitudes de onda TM que contrastan con las del bosque maduro, encontrándose similitudes entre la forma que tienen los parches de bosque secundario, con eventos de reventones confirmados en varios puntos del bosque amazónico (Nelson et al., 2016).

Pese a ser fenómenos meteorológicos de naturaleza distinta, a veces los daños generados por los tornados pueden ser confundidos con fuertes precipitaciones o vientos que los acompañan, o también con los denominados reventones o “downburst” (Gayà et al., 2011).

1.3. Objetivos

En el presente estudio se pretende delimitar el área afectada por el evento meteorológico extremo acaecido el 29 de agosto de 2020 mediante el empleo de técnicas de detección remota o teledetección. Para ello se emplean imágenes satelitales e índices para determinar qué área se ha visto afectada, así como qué índices e imágenes satélite son las óptimas para poder llevar a cabo dicha premisa. Además, puede servir para sentar precedente y poder ser incluido como parte de un plan de actuación en el marco del Plan Forestal Balear y ser empleado para el análisis de futuros eventos meteorológicos de índole similar que puedan darse en un futuro.

Los objetivos específicos que se presentan en el trabajo son:

- Muestrear la vegetación de la zona mediante trabajo de campo y clasificar cualitativamente según el grado de afección.
- Emplear técnicas de teledetección para el seguimiento y análisis en desastres meteorológicos.
- Buscar las imágenes satélite y cálculos de los índices óptimos para poder determinar la afección.
- Establecer una metodología que pueda ser integrada en el Plan Forestal Balear.

La hipótesis principal postula que la mejor técnica será aquella que, después de haber aplicado los índices correspondientes a las imágenes satélite de las zonas de muestreo recogidas y del cálculo de estadísticas, establezca el mayor umbral de diferencia entre los valores de las tres categorías, ya que será indicativo de que se ha podido discriminar la vegetación dependiendo de su afección.

1.4. Contexto geográfico

1.4.1. Área de estudio

La figura 1 sitúa sobre el mapa de Mallorca la localización en la que se ha realizado el presente trabajo. El área de estudio incluye dos de los tres municipios que fueron afectados por el evento meteorológico extremo: Banyalbufar y Esporles. Con una superficie de 1.803,13 km² y 3.526,55 km² respectivamente, están ubicados en el sector suroccidental de la Serra de Tramuntana, en la comarca

de nombre homónimo. Esporles comparte frontera con los municipios de Valldemossa, Palma y Puigpunyent, mientras que Banyalbufar lo hace con Valldemossa y Estellencs. En el año 2020 contaban con una población de 523 habitantes, en el caso de Banyalbufar y de 5.113 habitante en el municipio de Esporles, según datos de IBESTAT.

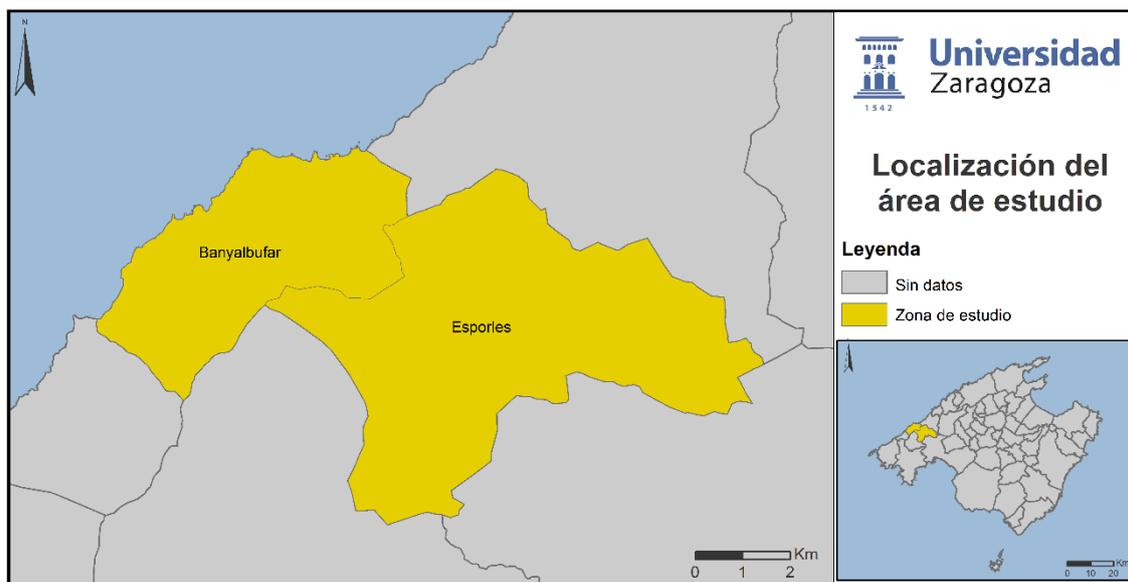


Figura 1: Mapa de localización del área de estudio. Fuente: elaboración propia.

1.4.2. Geología y climatología

Geología

Las Islas Baleares está ubicadas en el mar Mediterráneo. El archipiélago ocupa el centro oeste de su cuenca occidental, entre los paralelos 38° 40' 27" y 40° 05' 17" latitud norte y los meridianos 1° 17' 23" y 4° 2' 46" longitud este. Se sitúan frente a la costa valenciana y son la continuación de las montañas Béticas (Burjachs et al., 1994a). La isla de Mallorca, la mayor del archipiélago balear, con una extensión de 3640 km² es predominantemente de naturaleza calcárea. El sector septentrional (Tramuntana) tiene un relieve acentuado (Pérez i Obiol et al., 1999). En este sector, encontramos la principal cordillera de la isla y del archipiélago: la Serra de Tramuntana, la cual se extiende con una orientación del suroeste hacia el noreste. La estructura geológica de esta cadena alpina condiciona una vertiente meridional suave y una vertiente litoral o septentrional mucho más accidentada y abrupta, con predominio de acantilados de gran altura sobre el mar. La línea de cumbres supera los 600 m, siendo el sector central el más elevado. Existen numerosas cimas con altitudes superiores a los 1000 m, destacando el Puig Major como el pico más alto de la isla, con una altura de 1.445 m (Azañón Hernández y Mateos Ruiz, 2005a). Predominan los materiales calcáreos, formados casi exclusivamente por rocas sedimentarias, ricas en carbonato cálcico (molasses, calizas, conglomerados, margas), calizas compactas del secundario, que dan lugar a un abrupto relieve cárstico de cantiles y lapiaz y también rocas blandas del Mioceno, que generan relieves tabulares de escaso vigor (Burjachs et al., 1994b). En el sector suroeste de la Serra, donde se incluyen los municipios de Banyalbufar y Esporles, afloran materiales como rocas carbonatadas del Lías y otros más blandos de naturaleza fina, lo que determina un relieve más suave que el de la zona septentrional de la cordillera (Azañón Hernández y Mateos Ruiz, 2005b). En esta zona también son abundantes las turbiditas calcáreas del

mioceno pretectónico de Mallorca, que se caracterizan, entre otros factores, por contener frecuentes megaturbiditas. Se trata de capas formadas por brechas, conglomerados, calcarenitas y margas de potencias métricas, en general con granoclasificación positiva y cuyas estructuras sedimentarias predominantes son la laminación paralela y subordinadamente compleja (Rodríguez Perea, 1986).

Climatología

El clima de las Islas Baleares y, por tanto, de Mallorca, está condicionado por su latitud en el mar Mediterráneo occidental. Debido a esto, se encuentra sujeta a la influencia alternativa de dos tipos dominantes de circulación atmosférica: la de los vientos de poniente, característica de latitudes medias, con su sucesión de frentes nubosos, y otra de tipo subtropical, de escaso gradiente de presión y precipitaciones ocasionales de origen convectivo. La primera predomina en los meses más fríos, es decir, de noviembre hasta abril, mientras que la otra, en los meses más cálidos, (Guijarro, 1993). Se clasifica como clima templado, más concretamente, *Cs*, según la clasificación Köppen. Esta tipología tiene como característica más destacada la existencia de una estación seca, que coincide con la estación de verano en el hemisferio norte. Sin embargo, si ahondamos más en la escala de Köppen, dentro de los 3 tipos de clima *Cs* (*Csa*, *Csb*, *Csc*), la isla estaría bajo la influencia del tipo *Csa*, que registraría veranos tórridos con temperaturas medias máximas superiores a los 25°C y mínimas que no bajan de los 10°C. Sin embargo, en las zonas más altas de la Serra de Tramuntana, que no alcanzan temperaturas medias tan altas, se considera que tienen un clima *Csb* (Jansà, 2014).

El régimen de precipitaciones registra mucha más variedad de ocurrencia en Mallorca frente al resto de las islas del archipiélago. Se registra una irregularidad pluviométrica diaria muy notoria, con presencia de muchos episodios con altos valores de precipitación, especialmente en las zonas montañosas y orientales de Mallorca (Pastor et al., 2001). Las precipitaciones oscilan entre los 300 mm anuales en las zonas más meridionales hasta los 1200 mm en los valles ubicados en el sector central de la Serra de Tramuntana. De media, se registran 16 días con lluvias superiores a los 60 mm. La estación más lluviosa es durante el otoño, más concretamente en el mes de octubre. La configuración geográfica de la cuenca occidental del Mediterráneo genera tanto el desvanecimiento como la reactivación de las borrascas atlánticas, pero estas no son las únicas que traen precipitaciones importantes al archipiélago y, por ende, a la isla (Jansà, 2014). Las lluvias se asocian a vientos que movilizan el aire mediterráneo y los empuja frente a las costas montañosas. Este aire se puede considerar potencialmente inestable, sobre todo en otoño, cuando hay una bolsa de aire frío en altura. En estas zonas, que se podría considerar como un río de aire mediterráneo, se acaban formando sistemas convectivos importantes, capaces de generar mucha precipitación (Jansà, 2014). Se pueden relacionar estas precipitaciones con la aparición de frentes fríos. El frente frío es generado por el flujo de aire continental frío desde el norte, noreste o este sobre el Mediterráneo más cálido. Se ha observado que la mayoría de los eventos de precipitación ocurren directamente sobre el mar, y las lluvias torrenciales sobre el archipiélago, parecen ser el resultado de un proceso de dos pasos. La formación de una masa de aire potencialmente inestable a través de la advección del aire frío sobre el mar más cálido es el primer paso. A continuación, la diferencia de temperatura entre el aire ascendido y la temperatura de la superficie del mar juega un papel clave en la recarga de humedad. El segundo paso es el transporte hacia el este de la masa de aire potencialmente inestable hacia las regiones costeras donde la elevación orográfica puede desencadenar las precipitaciones (Pastor et al., 2001).

Otro factor que determina la aparición de precipitaciones es la presencia de configuraciones que favorecen la inestabilidad en las capas medias de la atmósfera (DANA y vaguadas). Las depresiones

aisladas en configuraciones de alto nivel tienen un impacto importante en la creación de episodios de precipitación intensa (Grimalt-Gelabert et al., 2021). DANA o Depresión Aislada en Niveles Altos son sistemas de presiones bajas a una escala sinóptica generadas como resultado de cambios meridionales en el denominado *jet stream* o corrientes de chorro (Juan Bazo et al., 2010).

La figura 2 manifiesta los datos expuestos con anterioridad. Los datos, obtenidos de la AEMET, aunque pertenecientes al municipio de Palma, son extrapolables, a grandes rasgos, a la realidad de la isla. Se observa un período de estrés hídrico que abarca desde el mes de marzo hasta el mes de septiembre, coincidiendo los meses más secos con la estación de verano. Los meses más lluviosos se concentran, sobre todo, en otoño, llegando al máximo de precipitación durante octubre. La línea de temperatura registra valores mínimos suaves, siendo enero y febrero los meses más fríos mientras que el máximo sucede durante el mes de agosto. La oscilación térmica anual es de unos 15°C, aproximadamente. Esta diferencia no es tan acusada debido al efecto regulador del mar, que permite no alcanzar valores tan extremos como en los climas mediterráneos continentales.

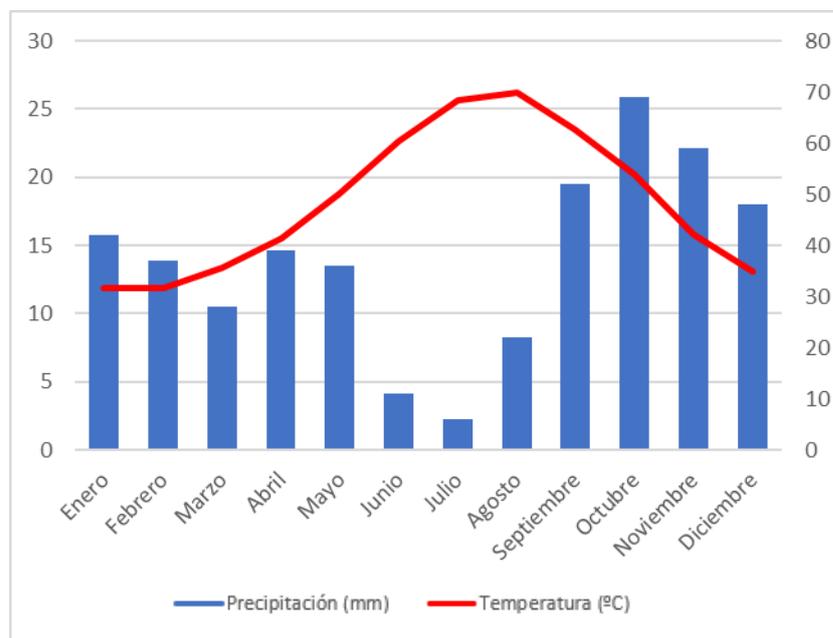


Figura 2: Climograma del puerto de Palma. Fuente: elaboración propia a partir de datos de la AEMET.

1.4.3. Vegetación y usos del suelo

Vegetación

Debido a las condiciones climáticas los bosques de la cuenca mediterránea están muy condicionados por la aridez y, en menor medida, por la deficiencia de nutrientes (Maestre & Cortina, 2004). Otra característica que ha condicionado y conformado estos ecosistemas ha sido la presión a la que han sido sometidos durante años debido a la acción del ser humano.

Como resultado de la actividad humana, las formaciones boscosas remanentes han sido modificadas en su composición de especies en favor de aquellas que tienen un valor añadido en cuanto a su explotación, como pueden ser algarrobos, olivos o pinos. Derivado de un proceso de roturación

e incendios, también han causado que los bosques hayan sufrido un proceso de aridificación, lo que ha sido otro factor clave para la sustitución de especies más vulnerables como los caducifolios frente a otras más resistentes como coníferas u de hoja perenne (Hechavarría y López, 2013).

Un ejemplo claro de ello es la vegetación en la isla de Mallorca, la cual se caracteriza por la influencia en el paisaje de una manifiesta acción antrópica, configurada desde la colonización romana y especialmente por la musulmana, determinando el paisaje balear tal como lo conocemos en la actualidad (Pérez i Obiol et al., 1999b). Esto puede observarse en construcciones como son los bancales o *marjades* los cuales fueron realizados a partir de la dominación árabe de la isla para poder aprovechar al máximo cualquier porción de tierra del territorio. Este hecho ha transformado el paisaje de muchas zonas de la Serra de Tramuntana debido a la necesidad de conseguir nuevas tierras para el cultivo, con la consecuente roturación de la vegetación existente. Además, estas nuevas construcciones, aparte de cambiar la vegetación, también cambiaron la configuración de la misma cordillera, llegando a influir en la dinámica de las vertientes (Grimalt Gelabert y Blázquez-Salom, 1989).

La vegetación en la isla de Mallorca se ha dividido en cinco zonas diferenciadas (De Bolòs i Capdevila, 1996):

Tabla 2: Zonas de vegetación de la isla de Mallorca.

Nivel culminal de matorral xeroacántico <i>Teucrietum subspinosi</i>
Dominio de la comunidad de encinar <i>Cyclamini - Quercetum ilicis</i>
Zona de garriga <i>Olea – Ceratonia</i>
Dominio de la maquia mallorquina <i>Cnero – Ceratonia</i>
Dominio de la comunidad <i>Cnero – Pistacietum</i>

Dentro de estas zonas, la vegetación se agrupa en distintas comunidades vegetales (De Bolòs i Capdevila, 1996):

Tabla 3: Comunidades vegetales presentes en la isla de Mallorca.

Vegetación rupestre no litoral
Vegetación del litoral marino
Vegetación heliófila de aguas dulces y suelos húmedos
Vegetación ruderal y arvense
Vegetación herbácea xerofítica y matorrales o bosques heliófilos
Bosques y bosquesillos densos

Las zonas vegetales que más se identifican con la zona de estudio son el dominio de la comunidad *Cnero – Pistacietum*, y los dominios de la comunidad *Cyclamini – Quercetum ilicis*, conformada por varias comunidades vegetales como vegetación ruderal y arvense, vegetación herbácea xerofítica y matorrales y zonas de bosques densos, más restringidos a zonas más abruptas y de peor accesibilidad (De Bolòs i Capdevila, 1996).

La vegetación herbácea xerofítica y matorral forma la mayor parte del territorio tanto insular como de las áreas estudiadas. En ellas se integran matorrales y vegetación herbácea anual, fruto de la transformación del medio por la mano del hombre. Dentro de esta categoría también se incluirían los

pinos compuestos por la especie *Pinus halepensis* Mill o pino carrasco. Los pinares no están considerados como bosques, pese a formar una comunidad arbórea. Esto se explica porque el dosel vegetal del pino no produce suficiente sombra como para detener el crecimiento de un sotobosque en el que destacan las especies heliófilas. Dentro de esta comunidad vegetal crecen especies como el pino carrasco, ya comentado anteriormente, la mata (*Pistacia lentiscus*), romero (*Salvia rosmarinus*) o trébol (*Trifolium scabrum*) (De Bolòs i Capdevila, 1996).

La vegetación ruderal y arvense está compuesta principalmente por especies herbáceas en ambientes que han estado alterados fuertemente por el hombre y con presencia de residuos orgánicos. Frecuenta las zonas pobladas o caminos, básicamente zonas antrópicas. Una característica que no suele ocurrir en el resto de las comunidades es que la mayor parte de las especies que la componen sean alóctonas, introducidas en el medio por el factor humano, mayormente de manera involuntaria. Como especies características se pueden encontrar la malva (*Lavaterum arborae*) o la especie foránea *Setaria pumila*, frecuente en campos de cultivo (De Bolòs i Capdevila, 1996).

Por último, la comunidad más interesante es la de los bosques conformada por encinares (*Quercus ilex*), que difieren de los encinares de la Europa más húmeda. La zonación altitudinal de estos bosques suele oscilar entre los 400 m y 800 m, aunque también se mezcla con otras comunidades como el pinar a alturas más bajas y en zonas más ombrías y húmedas. También se relaciona con comunidades *Olea – Ceratonion* en zonas donde el encinar está más degradado debido a la intervención del ser humano. Teniendo en cuenta estas peculiaridades, se puede diferenciar, pues, entre dos tipos de encinares: encinar denso y encinar con matorral (De Bolòs i Capdevila, 1996).

Cabe destacar la presencia de cultivos. La presencia de bancales indica un pasado agrícola del que aún quedan reminiscencias, pese a que muchos de ellos se han visto colonizado por especies arbustivas y herbáceas xerófilas. Destacan los olivares y los almendros como principales árboles frutales, así como el cultivo de regadío especializado en tomates, en los límites del núcleo urbano de Banyalbufar (De Bolòs i Capdevila, 1996).

La tabla 4 recoge los datos de superficie de las principales formaciones forestales arboladas de las Islas Baleares según así lo clasifica el informe del INF4 desarrollado por el Ministerio para la Transición Ecológica y Reto Demográfico. Las formaciones vegetales más representativas son pinares compuestos por *Pinus halepensis* y otras formaciones de coníferas, seguido por frondosas y acebuchales. Pese a ser del conjunto del archipiélago, es bastante representativo, ya que encaja de manera bastante fidedigna con la configuración vegetal del área de estudio, según los datos comentados en los párrafos anteriores.

Tabla 4: Principales formaciones forestales arboladas de las Islas Baleares por especie y superficie en ha y porcentaje. Fuente: elaboración propia a partir de datos del INF4.

Formaciones forestales arboladas	Superficie (ha)	
	(ha)	%
Acebuchales (<i>Olea europaea</i>)	42.261,81	22,8
Encinares (<i>Quercus ilex</i>)	13.147,26	7,09
Frondosas autóctonas	55.409,07	29,89
Pinares de pino carrasco (<i>Pinus halepensis</i>)	80.116,85	43,21
Sabinas de <i>Juniperus phoenicea</i>	2.760,83	1,49

Masas dominadas por coníferas autóctonas	82.877,68	44,7
Bosques mixtos de frondosas autóctonas	5.639,16	3,04
Mezclas de coníferas autóctonas	5.553,18	3
Mezclas de coníferas y frondosas autóctonas	35.906,39	19,37

Usos del suelo

Según recoge la Consejería de Medio Ambiente y Territorio de las Islas Baleares los espacios naturales protegidos son las zonas terrestres y marinas de las Islas Baleares declaradas como tales en la forma prevista a la Ley 5/2005, de 26 de mayo, para la conservación de los espacios de relevancia ambiental (LECO), atendiendo su representatividad, singularidad, fragilidad o interés de sus elementos o sistemas naturales. La Serra de Tramuntana, es una zona terrestre incluida dentro de esta definición, y goza de varias figuras de protección que así lo acredita. Gran parte de la cordillera, así como la totalidad del área de estudio, está considerada como “Paraje Natural” de acuerdo el Consejo de Gobierno de 16 de marzo de 2007. (BOIB nº. 54 EXT, de 11 de abril de 2007). Otras figuras de protección que están activas en el área de estudio son LICs y ZEPAs,

En la figura 3 se representan los usos del suelo de los municipios incluidos en el área de estudio. La mayor parte del territorio está definido como pastizal, aunque la realidad es que, pese a la denominación que le otorga el SIOSE, prácticamente gran parte de esa superficie está cubierta por pinares. Esto es debido a que, como se ha explicado en el apartado de vegetación, los pinares no están clasificados como formaciones boscosas por las razones expuestas anteriormente.

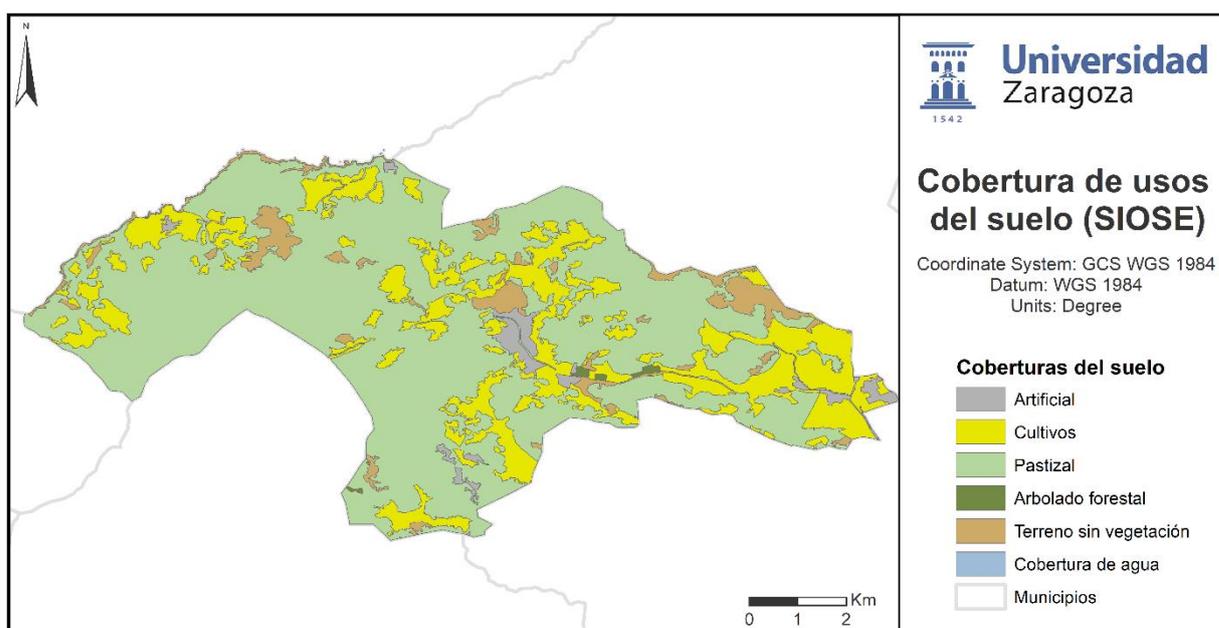


Figura 3: Mapa de cobertura de usos del suelo. Fuente: elaboración propia a partir de datos del SIOSE.

La siguiente cobertura que destaca es la de cultivos, mucho más extendida en el municipio de Esporles debido a que cuenta con una orografía menos abrupta; de hecho, cuanto más al este, más llano es el terreno, en contraposición al del municipio de Banyalbufar, en la que se concentra en los reductos que quedan de banales o *marjades*, los cuales permiten practicar la agricultura en zonas con pendientes y terreno tan escarpados e irregulares.

Las formaciones boscosas de arbolado forestal solo se encuentran en el municipio de Esporles, pese a que en Banyalbufar también existen zonas de bosque conformados por la especie *Quercus ilex*, aunque combinado con pinares y otras comunidades arbustivas. En contraposición también existen zonas desprovistas de vegetación, las cuales casan con crestas de colinas, fundamentalmente.

Por último, los terrenos artificiales se identifican con los principales núcleos de población: Esporles junto con Es Verger y Banyalbufar con la aldea el Port des Canonge.

2. Metodología

2.1. Categorización de la vegetación afectada y digitalización de polígonos

Para poder determinar la extensión del área afectada por el evento meteorológico extremo, el primer paso es realizar el trabajo de campo in situ para poder valorar los daños que se han producido en la vegetación de la zona de estudio y categorizarlas cualitativamente en función de la afección que hayan sufrido. La afección se ha dividido en tres categorías:

Tabla 5: Categorización de la zona de estudio. Fuente: elaboración propia.

Estado de la vegetación	Categoría	Foto
No ha sufrido daños o han sido mínimos.	Sin afección	
La vegetación tiene daños evidentes.	Afección media	
Los daños han causado serios daños o han destruido la vegetación	Afección severa	

El muestreo, pues, se llevó a cabo mediante el visor de mapas para dispositivos Android Oruxmaps. Oruxmaps permite, mediante el uso de mapas online u offline, situar *Waypoints* (puntos), mediante seguimiento GPS o manual, que almacenará información relevante como las coordenadas, fecha y añadirle atributos como el nombre y foto al punto. Como mapa base se ha empleado una capa online correspondiente al Mapa Base IGN y el sistema de coordenadas WGS 84.

Se tomaron, en total, 45 puntos, la mayoría de ellos en el municipio de Banyalbufar, el más afectado, con un total de 43, mientras que en Esporles se tomó 2 puntos. De esos 45 puntos, quince fueron para cada una de las tres categorías expuestas anteriormente. En el municipio de Valldemossa no se realizó ninguna captura, ya que la orografía del terreno ha hecho imposible acceder a aquellas zonas que presuntamente fueron afectadas. La toma de puntos estuvo condicionada por dos factores: uno fue la orografía de la zona, bastante abrupta, con grandes desniveles en algunas zonas; por otra parte, el régimen privado de propiedad que impera en casi todas las fincas de la Serra de Tramuntana impide el acceso a no ser de la existencia de algún camino de titularidad pública. Por eso, la mayoría de los puntos obtenidos fueron desde la carretera MA-10. En el caso del municipio de Banyalbufar, sí que se encontró una mayor accesibilidad gracias a la existencia de un camino denominado “Volta del General” que discurre por la zona litoral y que une los núcleos de Port des Canonge y Banyalbufar.

En la figura 5 se ha ilustrado la localización de las muestras tomadas sobre el terreno mediante el uso de la aplicación de Oruxmaps.

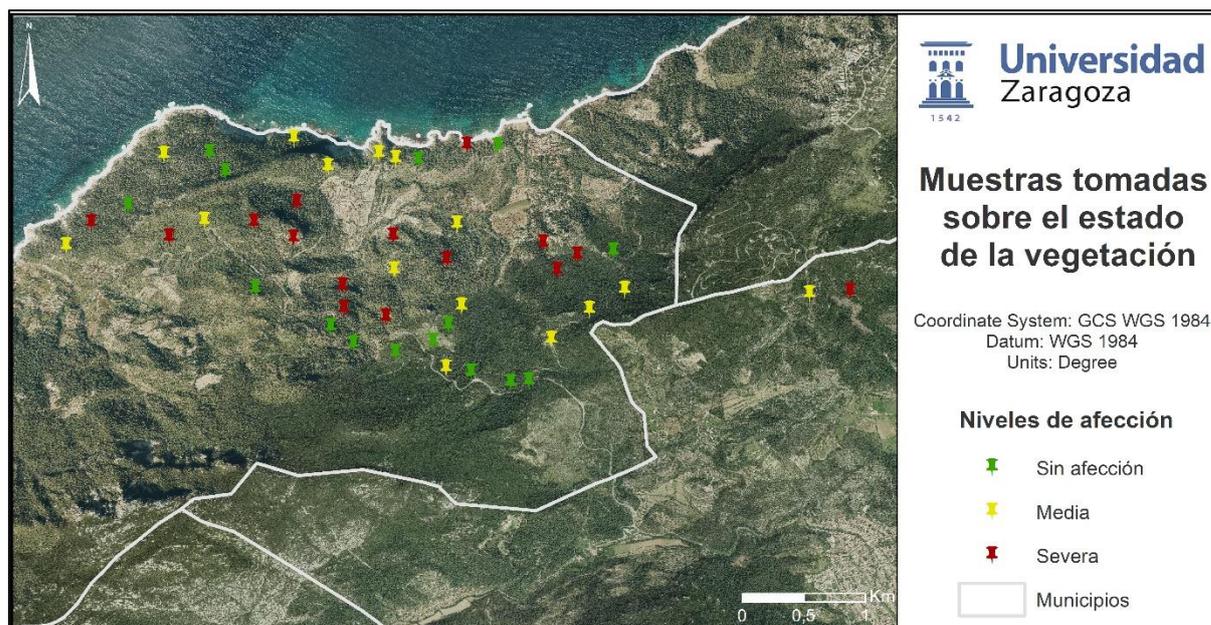


Figura 4: Mapa de localización de las muestras tomadas sobre el estado de la vegetación.

Una vez realizado el muestreo, se llevó a cabo la exportación de los *Waypoints* a formato *kml* para poder ser exportados y tratados con el software ArcMap. La información introducida se ha convertido en un archivo *shp* para, posteriormente, aplicar la herramienta *Buffer*, que permite generar polígonos de cada uno de los puntos con un área de influencia de 20 metros y así obtener un área óptima para poder extraer, posteriormente, información espectral de cada uno. El archivo se ha denominado “Tramontana”.

2.2. Extracción de valores de reflectividad de imágenes Sentinel-2 mediante GEE

Una vez obtenidos los polígonos, ya están en disposición de poder ser empleados para la obtención de la información espectral. Para poder comparar el cambio en el comportamiento de la vegetación en la zona después de la ocurrencia del evento meteorológico, es necesario obtener imágenes con una dimensión espacial de un año, ya que es el tiempo aproximado que la vegetación cumple su ciclo fenológico. Entonces, se podrá comprobar cómo ha evolucionado ante tal evento y qué zonas han sufrido más o menos afectación o si ha habido, o no, recuperación.

Para la obtención de las imágenes satélite se ha optado por el empleo del satélite Sentinel-2, perteneciente a la ESA. Cuenta con 13 bandas, de las cuales cuatro de ellas (en el azul, verde, rojo e infrarrojo cercano) tienen 10 m de resolución espacial, seis tienen 20 m de resolución que incluyen bandas en el red-edge y en el SWIR y las otras tres tienen 60 m para la corrección atmosférica y detección de nubes (Delegido et al., 2016). El sistema de sensores Sentinel-2 proporciona una mejora significativa en la cobertura espectral, la resolución espacial y la frecuencia temporal con respecto a la generación actual de sensores tipo Landsat, como por ejemplo Landsat 8 (Hill, 2013). Esta mayor resolución y frecuencia resulta ideal para el estudio de la vegetación de una manera más precisa y con mayor calidad, ya que la disponibilidad de imágenes óptimas para el cálculo de índices se incrementa, así como poder obtener una mayor fiabilidad en los resultados finales.

El hecho de que el estudio contemple el manejo de un año de imágenes satélite provoca que se

tenga que manejar una cantidad ingente de información, la cual, si hubiera habido que gestionar de forma individual, hubiera conllevado una gran inversión en tiempo. Para paliar este contratiempo, se ha optado por el empleo de la herramienta GEE. Esta plataforma desarrollada por Google consiste en un catálogo de datos de varios petabytes listo para el análisis. Se accede y se controla a través de una interfaz de programación de aplicaciones (API) accesible a través de Internet y un entorno de desarrollo interactivo (IDE) asociado basado en la web que permite la rápida creación de prototipos y visualización de los resultados, variedad de sistemas de imágenes por satélite y aéreas en longitudes de onda ópticas y no ópticas, variables ambientales, pronósticos meteorológicos y climáticos, entre otros (Gorelick et al., 2017). La extracción de los datos de reflectividad de las imágenes (UTM/WGS84) del producto Level-2 de Sentinel (colección: ee. ImageCollection (“COPERNICUS/S2_SR”)), correspondiente al periodo de estudio, se ha realizado, pues, mediante GEE. Se extrajeron valores de reflectividad (BOA) para cada punto de verificación en campo, aplicando una función de máscara mediante la banda Sentinel-2 bitmask band QA60. Esta banda recoge información de la presencia de nubes a nivel de pixel. Los códigos para cada una de las posibles distorsiones de las imágenes son: *1024 for opaque clouds and a value of 2048 for cirrus clouds* (1024 para nubes opacas y valor 2048 para nubes *cirrus*). La detección de las nubes es un paso obligatorio para el desarrollo de un estudio mediante teledetección. Las nubes no detectadas en las imágenes satélite obtenidas empeoran la calidad de los resultados. Por ellos es necesario la aplicación de una máscara de nubes o *cloud mask* en la serie temporal para obtener unos resultados óptimos (Mateo-García et al., 2018).

Una vez ejecutado el script, se ha obtenido un archivo csv en el que se recogen todos los datos de reflectividad y el cálculo de NDVI para cada una de las bandas de Sentinel-2, para cada fecha y por cada polígono de vegetación. Se han creado dos nuevas columnas para separar la afección (sin afección, media o severa) del número de polígono y otra nueva columna en la que se le otorga un valor numérico en una escala del 1 al 3 dependiendo de la afección de cada una de las entidades creadas. La clasificación es tal que así: 1 es sin afección; 2 afección media; 3 afección severa.

Aquellos valores cuyo campo QA60, el que está relacionado con la calidad de la imagen, sean distintos a 0 han sido señalados, pero no eliminados. Esto es debido a que, si existe algún código de error, —como los comentados anteriormente (1024 o 2048)—, el resultado puede salir distorsionado.

Una vez realizado esto, se procede al cálculo del resto de los índices en la misma tabla de Excel.

2.3. Cálculo de índices de la vegetación

Los índices de vegetación permiten delinear la distribución de la vegetación y el suelo basándose en los patrones de reflectancia característica de la vegetación (Gandhi et al., 2015). Las fórmulas para el cálculo de los índices han sido extraídas de la base de datos de IDB. A continuación, se detallarán cada uno de los índices calculados.

2.3.1. NDVI

NDVI o Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada es un indicador numérico simple que puede ser usado para analizar mediciones de teledetección y evaluar si el objetivo u objeto que se está observando contiene vegetación verde viva o no (Gandhi et al., 2015). Los valores entre los que el NDVI oscila, son -1, en el caso de menor vigor o presencia vegetal, hasta 1, el máximo. La fórmula para obtener este índice es la siguiente:

$$NDVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4)}$$

Estas bandas promediadas sobre rangos de longitudes de onda en la banda 4, o en la región visible (1 - 0.6 Pm, "rojo") y en la banda 8, o infrarrojo cercano, NIR (2 - 0.8 Pm) del espectro, respectivamente. A pesar de ser ampliamente utilizado como índice de referencia para estudios sobre vegetación, este índice ha sido criticado por varias razones. Por una parte, los aerosoles y el efecto de la atmósfera distorsionan los resultados tal y como saldrían si se midiera en la superficie terrestre; por otra parte, las diferencias en el brillo que el suelo emite pueden variar los valores de NDVI de una imagen a otra (Carlson & Ripley, 1997). El resultado será un valor que oscile entre 1 y -1; sin embargo, aquellos que se encuentran en negativo suelen corresponder con cuerpos de agua, nubes o superficies nevadas.

2.3.2. SAVI

SAVI o Índice de Vegetación Ajustado al Suelo intenta minimizar los efectos del suelo relacionados con el brillo al considerar la interacción entre el suelo y la vegetación de primer orden mediante un parámetro de ajuste del suelo (L en este caso). Las condiciones del suelo ejercen una influencia considerable sobre los índices de vegetación calculados. Se han observado influencias suaves de brillo en numerosos estudios donde, para una cantidad dada de vegetación, los sustratos de suelo más oscuros dieron como resultado valores de índice de vegetación más altos calculados mediante índices como el NDVI (Huete, 1988). La fórmula para el cálculo del índice es:

$$SAVI = \frac{(B8 - B4)}{(B8 + B4 + L)} + (1 + L)$$

La fórmula es muy similar a la utilizada para el cálculo del índice NDVI, sin embargo, entra en escena el valor L . Vuelve a emplearse la banda 8 (infrarrojo cercano o NIR) y la banda 4 (espectro visible "rojo"). Como se ha comentado anteriormente, esta nueva variable L sirve para paliar las distorsiones derivadas por el brillo que emite el suelo. El valor de L por defecto, según sugiere el autor, es de 0.5 para aquellas superficies con cubierta vegetal media o cultivos (Gilbert et al., 2002). El resultado que generará, al no ser un índice normalizado como sí lo es el NDVI, podrá oscilar fuera de los parámetros de -1 y 1.

2.3.3. NBRi

NBRi o Índice de Ratio de Áreas Quemadas es un índice normalizado pensado para detectar las zonas de vegetación afectadas por un incendio. Este índice también puede ser conocido por otros nombres, ya que la fórmula empleada es ampliamente usada para conocer el contenido de humedad que tiene la vegetación (Ji et al., 2011). La fórmula es la siguiente

$$NBR = \frac{(B8 - B12)}{(B8 + B12)}$$

La fórmula emplea la reflectividad de la banda 8 o NIR y de la banda 12 o SWIR. Es bastante similar al del índice NDVI, únicamente con la diferencia de que en vez de emplear la banda 4, la cual contiene información de reflectividad del espectro visible rojo, se aplica la banda 12 o del infrarrojo medio, ya que es sensible a la concentración del agua de las hojas debido a la absorción de la energía electromagnética en esta longitud de onda. La reflectancia SWIR generalmente disminuye a medida que aumenta el contenido de agua en las hojas (Ji et al., 2011)

2.3.4. CCCI

CCCI o Índice de Contenido de Clorofila del Dosel permite conocer el contenido de clorofila de las hojas de las especies vegetales. Este índice es muy usado en la agricultura para estimar qué cantidad de fertilizante necesitan los cultivos, ya que se relaciona directamente la cantidad de clorofila que contiene la hoja con el nitrógeno que tiene disponible la planta (Cammarano et al., 2011; Fitzgerald et al., 2010). La fórmula es la siguiente:

$$CCCI = \frac{\frac{(B9 - B5)}{(B9 + B5)}}{\frac{(B9 - B4)}{(B9 + B4)}}$$

La fórmula es el resultado entre el cociente del NDRE y el NDVI. Ambos son considerados como índices de vegetación, si bien el NDRE tiene mayor sensibilidad ante los cambios de la clorofila de los cultivos debido al uso de la B5 Red Edge.

2.3.5. SLAVI

El área foliar específica (Specific Leaf Area -SLA- la medida del área de las hojas por una cara, dividido por el peso seco de las hojas) es una variable ecológica relacionada con las propiedades eco-fisiológicas y bioquímicas de las plantas que, a su vez, se vinculan con las propiedades ópticas de las hojas. Valores bajos de SLAVI, cuyos rangos pueden oscilar entre 0 y 2.5, incluso 3, se vinculan con bajas concentraciones de clorofila a, clorofila b y xantofila; con la presencia de compuestos de carbono no metabólicos como la celulosa, la hemicelulosa y la lignina en las paredes celulares y con bajos contenido de agua (Lymburner et al., 2000).

$$SLAVI = \frac{B9}{(B5 + B12)}$$

La fórmula divide la banda 9 o NIR entre el resultado de la suma de la banda 5 (rojo) y la banda 12 SWIR. Se ha demostrado que existe una correlación entre la SLA y la banda 9, como por ejemplo en bosques abiertos donde se detecta una baja reflectividad, así como una baja SLA. Por otra parte, lo contrario sucede en la banda 12, en la que hay una correlación negativa debido a que el contenido de agua de las hojas afecta la reflectancia en esta longitud de onda, siendo esta baja cuando el SLA es alto (Lymburner et al., 2000).

2.3.6. Tasseled Cap

El Tasseled Cap es un tipo de transformación, enmarcado dentro del procedimiento matemático PCA o análisis de componentes principales, cuyo cometido es convertir los datos de una imagen en un nuevo sistema de coordenadas, formado por un conjunto de ejes ortogonales con el objetivo de reducir información espectral a tres componentes principales: brillo, verdor y humedad. (Insaurralde, 2019; Kauth, 1976; Luna Ángeles, 2018).

El componente verdor (greenness) está normalmente ligado a la vegetación. La fórmula da lugar a que las bandas del visible den resultado negativo y la del NIR sea positivo, para generar contraste entre ellas, mientras que las bandas del SWIR se eliminan. Tanto el GVI como GVI MSS (Luna Ángeles, 2018). La fórmula para este componente es la siguiente:

$$GVIMSS = -0.283 * B3 - 0.660 * B4 + 0.577 * B6 + 0.388 * B9$$

$$GVI = -0.2848 * B2 - 0.2435 * B3 - 0.5436 * B4 + 0.7243 * B8 + 0.0840 * B11 - 0.1800 * B12$$

El componente humedad (WET) se suele relacionar con la cantidad de agua o humedad presente en la vegetación y en el suelo. Se identifica gracias al contraste con el SWIR, que es la banda donde se registra de manera más evidente la absorción por parte del agua (Luna Ángeles, 2018). La fórmula para calcular el componente está a continuación:

$$WET = 0.1509 * B2 + 0.1973 * B3 + 0.3279 * B4 + 0.3406 * B8 - 0.7112 * B11 - 0.4572 * B12$$

2.4. Comprobación de los datos y análisis ANOVA

Después de realizar el cálculo de los índices de vegetación expuestos anteriormente, es necesario realizar una comprobación para cerciorarse de que todos los datos que se han obtenido tengan la calidad óptima para un buen resultado. Esto significa que no pueden contener distorsiones como valores de reflectividad erróneos, fruto de la presencia de nubes o sombras en las imágenes.

Por ello, se ha llevado a cabo una primera comprobación mediante la creación de tablas dinámicas en el que se ha promediado para los 15 puntos, por afección y fecha, los resultados de los índices de vegetación para, así, poder resumir la información y poder crear gráficas que permitan encontrar si existe alguna fecha que muestre valores anómalos y poder realizar una comprobación de la base de datos en busca del error.

Con los datos debidamente comprobados, se ha llevado a cabo un análisis de varianza (ANOVA) para medidas repetidas en el tiempo entre los resultados de los índices, combinando los grados de afección en grupos de dos: sin afección frente a afección media; sin afección frente a afección severa; afección severa frente a afección media y así determinar si existe una diferencia significativa entre los diferentes índices de vegetación observados en puntos con diferentes grados de afección. Dependiendo del valor de F y su valor de probabilidad, se determina si difieren entre ellos o no: en este trabajo se ha utilizado un umbral de probabilidad de 0.05 para determinar la existencia de diferencias significativas. Todos los análisis han sido realizados en el entorno de programación R¹ (R Core Team (2021)).

¹ R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

3. Resultados

3.1. Resultado de los índices de vegetación y validación de los datos

En total, con la aplicación de los parámetros especificados en el script de GEE, se han obtenido 49 imágenes satélite que, presuntamente, cumplieran con los requisitos de ausencia de nubes (con un código QA60 igual a 0, lo que se traduce en imagen sin distorsiones) para poder obtener unos resultados óptimos de los índices propuestos.

Para el cálculo, como se ha especificado en la metodología, se han empleado los valores de reflectividad extraídos para cada polígono de las imágenes satélite de Sentinel-2, a los que se les ha aplicado las fórmulas descritas anteriormente.

Los valores obtenidos, a simple vista, no pueden ser analizados debido a la gran cantidad de puntos y fechas manejadas, por lo que se ha optado por sacar el promedio de cada índice por cada grado de afección para cada fecha.

El resultado ha sacado a la luz anomalías en los valores de los índices que, supuestamente, deberían haber salido de forma idónea. Mediante la representación de estos en gráficas, se han podido observar cómo en todos los índices existían fechas concretas que ofrecían valores anómalos, con bastante diferencia con la imagen anterior y/o la siguiente. La principal sospecha ha sido la presencia de elementos que distorsionan la imagen, como nubes o sombras. Después de comprobar mediante el visor Sentinel Playground las 49 imágenes satélite fecha a fecha, se ha encontrado que 34 no cumplían con las características puestas en el script, pese a que el campo QA60 no indicaba que tuvieran cualquier código de error. Por lo tanto, se ha optado por eliminar esas fechas, reduciéndose a 15 las imágenes óptimas para el estudio. En la tabla 5 se muestran las fechas de las imágenes que finalmente se han usado para la elaboración del estudio, una vez comprobadas que no contienen elementos que resten calidad a la imagen. Puesto que el evento sucedió el 29 de agosto, hay datos de cuatro días antes para poder tener una referencia de cómo eran los valores predesastre.

Tabla 6: Fechas escogidas para el estudio. Fuente: elaboración propia.

05/08/2020	10/08/2020	15/08/2020	25/08/2020	24/09/2020
29/09/2020	19/10/2020	29/10/2020	13/11/2020	23/03/2021
28/03/2021	17/05/2021	26/06/2021	01/07/2021	06/07/2021

En base a estas fechas y los puntos tomados, se han calculado y obtenido los resultados estadísticos de los análisis ANOVA para cada índice y grado de afección, y se han elaborado gráficas que permiten contrastar visualmente e interpretar los datos extraídos a partir de las estadísticas.

3.2. Interpretación de los datos obtenidos

3.2.1. NDVI

El cálculo del análisis ANOVA para el índice de NDVI ha generado los siguientes resultados: en primer lugar, se ha comparado las zonas con vegetación no afectada con aquella cuya afección era de tipo media. Los valores de F obtenidos fueron de 14.32, con un $Pr > F$ de 0.000748. Estos valores indican que los índices difieren mucho entre las zonas afectadas, lo que se traduce en una clara diferenciación entre los puntos no afectados con aquellos considerados medios. Si comparamos los

puntos sin afección con los que tienen una afección severa, F se eleva a 16.04, con un $Pr > F$ de 0.000414. Estos valores señalan una diferenciación en el índice NDVI en zonas con grados de afección aún mayor. Finalmente, se han analizado la afección media y afección severa. El valor F muestra una cifra de 0.299, con un $Pr > F$ de 0.589, lo que señala que no difiere de forma significativa un tipo de vegetación con el otro.

En la figura 5 se puede observar la representación del índice de NDVI a lo largo de la serie temporal para cada grado de afección. Si se compara con el análisis ANOVA descrito anteriormente, se observa cómo, efectivamente, los puntos de vegetación sin afección difieren de manera clara respecto a los otros puntos sí afectados durante el evento. La diferencia máxima de valores se encuentra el día 23/03/2021 entre aquellos puntos sin afección y aquellos con afección media, mientras que el 28/03/2021 ocurre con los que registraron afección severa y los que no tuvieron ningún tipo de afección. En cuanto a los puntos con los dos tipos de afección, se observa cómo hay una ligera diferencia entre ellos, siendo la más acusada la de la fecha 29/09/2020 poco después del evento, pero sin llegar a ser lo suficientemente importante como para que sea significativa.

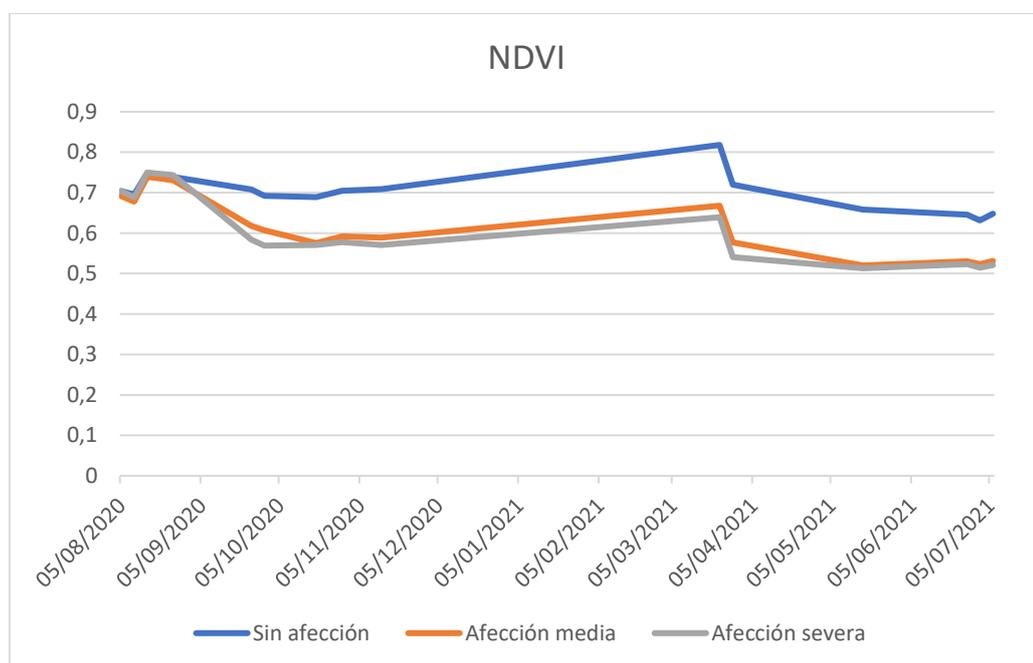


Figura 5: Evolución NDVI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021. Fuente: elaboración propia.

3.2.2. SAVI

En el caso del índice SAVI, el análisis ANOVA elaborado a partir de la comparativa entre los puntos de afección media y aquellos clasificados como “sin afección” ha dado lugar a un resultado de F de 5.649 y de $Pr > F = 0.0245$. Estos valores se traducen en la existencia de una diferenciación significativa entre los puntos caracterizados como no afectados y aquellos como afección media. Si se realiza el análisis entre la vegetación sin afección y la afectada severamente, el valor F arroja un resultado de 6.809 y un $Pr > F$ de 0.0144, siendo más reducida que el resultado anterior, con una significativa diferencia entre ellos. El análisis para los grados de afección medio y severo, con un valor F de 0.378 y $Pr > F$ de 0.543 es el que menos difiere de manera relevante de entre las tres posibilidades calculadas.

En la figura 6 se ve plasmada la evolución del índice SAVI de los puntos entre las fechas especificadas. Se observa en el gráfico que apenas existe una diferencia notable entre los valores del

índice entre los grados de afección, siendo más pronunciada esta entre los puntos sin afección y los que presentan algún tipo de daño que entre los que tienen grado de afección medio y severo. La fecha donde existe una mayor amplitud entre categorías es para el 17/05/2021 entre los puntos sin afección y afección media; 23/03/2021 entre aquellos sin afección y afección severa y, finalmente, entre los grados con algún tipo de afección es durante el 24/09/2020, primera fecha inmediatamente después del evento.

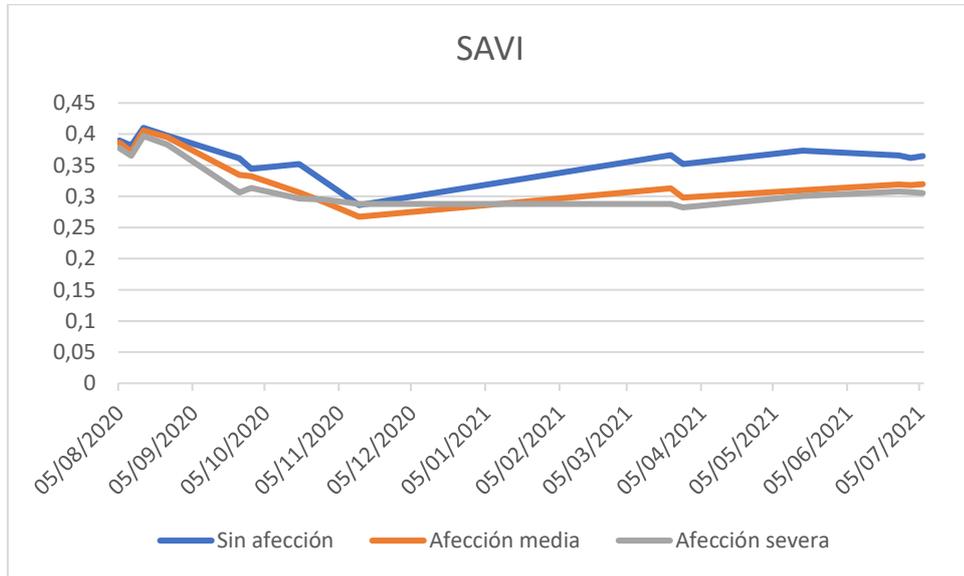


Figura 6: Evolución SAVI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021. Fuente: elaboración propia.

3.2.3. NBRi

El análisis ANOVA aplicado para el índice NBRi ha analizado la varianza entre los puntos sin afección y aquellos que tienen una afección media. Como resultado, el valor F ha dado 16.46, mientras que $Pr > F$ ha sido de 0.000361. Este indicador señala que difieren de forma significativa entre ambos grados de afección, diferenciándose entre sí. Si se realiza el análisis cogiendo los puntos sin afección y los puntos que sufren afección severa, el resultado de F es de 22.74, mientras que $Pr > F$ de 0.0000521. Esta cifra indica que existe una diferencia significativa con la afección media. El tercer y último análisis, entre los grados de afección medio y severo arroja un resultado de F igual a 0.905 y un $Pr > F$ de 0.35. Estos datos señalan que no existe una distinción lo suficientemente importante para considerar diferentes los valores del índice en zonas con estos dos grados de afección

En la figura 7 están representados los datos de los puntos para el índice NBRi entre las fechas seleccionadas. Al contrario que el SAVI, este índice tiene cierta similitud con el NDVI, puesto que, al igual que este, la diferenciación entre los puntos sin afección y aquellos con algún tipo de afección se ve bien marcada. La fecha donde se registra el mayor alejamiento entre los valores de los puntos de grado medio y severo respecto a los de grado sin afección es el 23/03/2021, mientras que los de grado severo entre aquellos con grado medio ocurre el 29/10/2020.

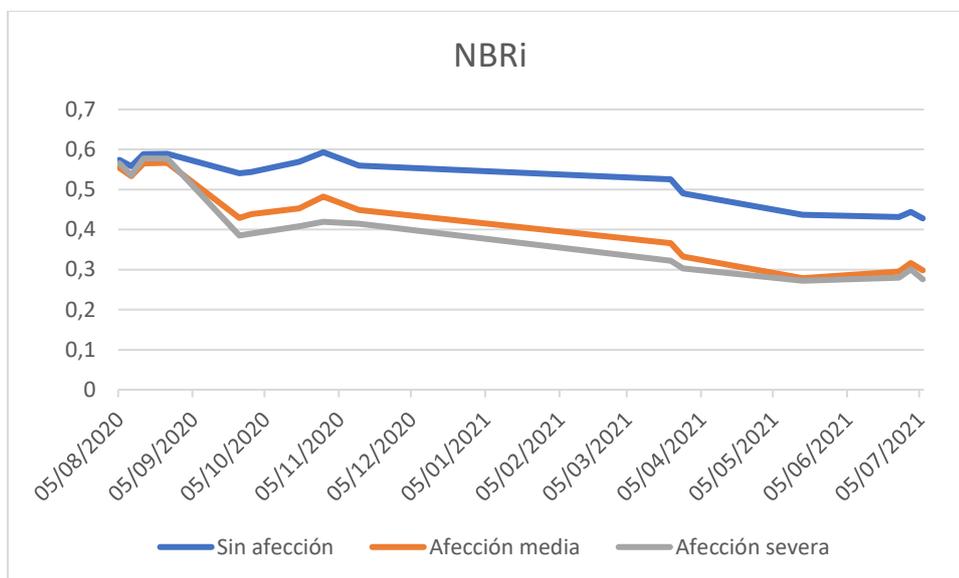


Figura 7: Evolución NBRI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021. Fuente: elaboración propia.

3.2.4. CCCI

En el caso del índice CCCI el análisis ANOVA ha generado los siguientes resultados: el primero de los grados analizados, lo de los puntos sin afección y con afección media, el análisis ha resultado con un valor F de 0.433, y $Pr > F$ de 0.516, o lo que es lo mismo, no existe diferenciación entre las variables que se han escogido. El mismo caso pasa con los puntos que no tienen afección con aquellos que están calificados como severo. Aquí los valores que han resultado han sido de $F = 0.287$ y $Pr > F = 0.597$, por lo que sigue el mismo patrón de no tener una diferencia significativa entre ellas. Finalmente, para el caso de los puntos con afección media y severa, el valor que arroja el análisis es de 0.028 para F y de 0.868 para $Pr > F$.

Si lo extrapolamos al gráfico de la figura 8, se observa como los valores de CCCI de los puntos de los tres tipos de afecciones no tienen apenas ningún tipo de diferenciación, como bien ha indicado el análisis realizado por ANOVA. De hecho, solo encontramos un pequeño desmarque entre los valores de clorofila de la afección media y el resto, que ocurre el 29/09/2020, entre los puntos de afección media con los puntos que no tiene afección alguna. Si lo comparamos entre el contenido de CCCI de los puntos con afección severa y los que no tienen, fecha sería el 13/11/2020, mientras que esto mismo, pero entre los puntos severos y medios, el momento del año es el 29/10/2020.

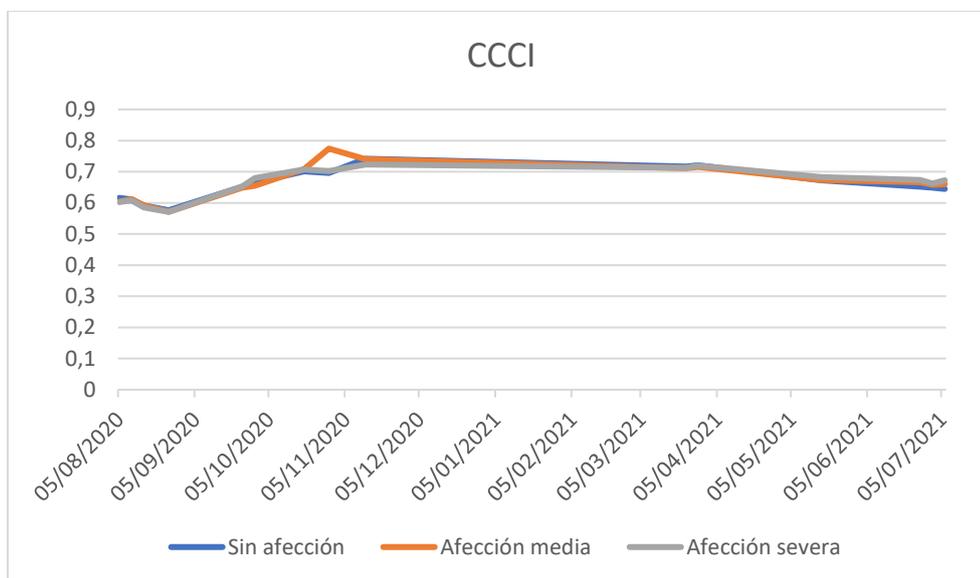


Figura 8: Evolución CCCI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021. Fuente: elaboración propia.

3.2.5. SLAVI

Los resultados del análisis ANOVA para el cálculo del índice SLAVI de los puntos han dado los siguientes valores. El primer caso, se ha demostrado que sí hay una diferencia significativa entre los puntos sin afección y los que tienen una afección media, ya que el valor F es igual a 14.42, y el $Pr > F$ es de 0.000722. El segundo caso, en el análisis realizado entre los puntos sin afección y los puntos afectados severamente, el resultado ha ido de F con valor de 10.78 y un $Pr > F$ de 0.00276. Es curioso que, pese a que difieren los dos grupos estudiados entre sí, las estadísticas obtenidas sean menores comparando los puntos con afección severa que con los comparados con afección media. Finalmente, en el tercer caso, el análisis entre estos dos últimos grados, el resultado ha arrojado un valor de $F = 0.012$ y $Pr > F = 0.912$, insuficientes para poder determinar que exista una diferencia significativa entre ellos.

En la gráfica de la figura 9 se representan los puntos con los valores del índice SLAVI calculado. Se observan de manera clara la diferenciación entre los puntos sin afección y los que sí tienen algún grado, desde la fecha después del evento. El día con una mayor diferencia entre valores de SLAVI es el 13/11/2020, curiosamente, entre todos los grados de afección, al contrario que el resto de los índices analizado hasta ahora.

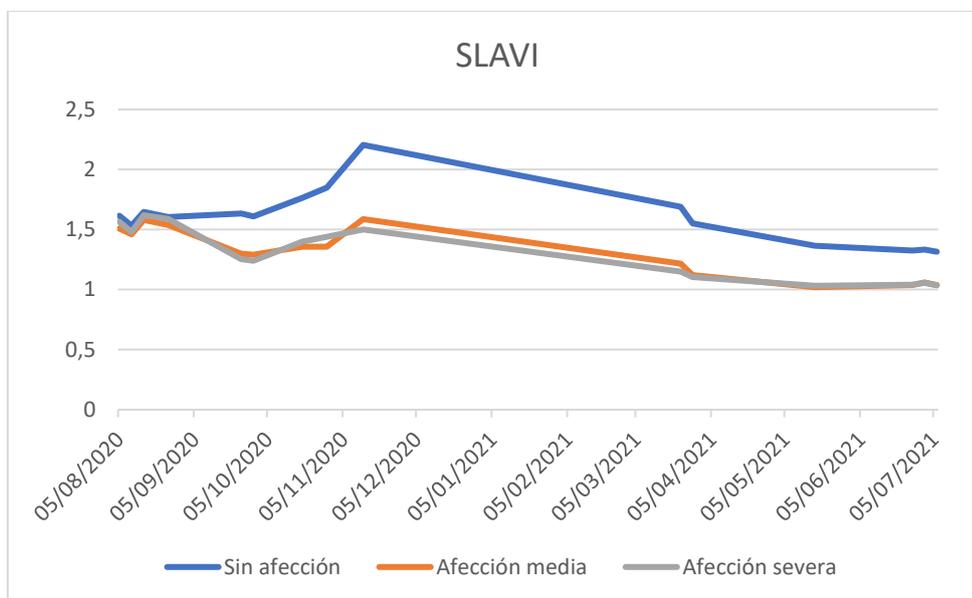


Figura 9: Evolución SLAVI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021. Fuente: elaboración propia.

3.2.6. Tasseled Cap: GVI-MSS

El análisis ANOVA aplicado, en este caso, al componente greenness MSS calculado para los puntos de afección da como resultados lo siguiente: para determinar la diferencia de verdor entre los puntos sin afección y con afección media, los valores F y $Pr > F$ dan valores de 2.43 y 0.13 respectivamente, lo que se deduce que no difiere de manera significativa entre un grado y otro de afección. En el caso del análisis realizado entre los puntos sin afección y aquellos con afección severa, F da como resultado 2.618, y $Pr > F$ de 0.117, menor incluso que con los puntos de afección media, pero sin diferenciarse de manera significativa, siendo valores medios muy similares. Finalmente, el grado de verdor entre los puntos con afección media y severa, con un valor de $F = 0.141$ y de $Pr > F = 0.71$, también señala que no existe una diferencia significativa entre las dos variables estudiadas.

La figura 10 representa la evolución del índice de verdor de los puntos tomados en tres grados de afección. Apenas se ve representada una diferencia significativa entre los valores de verdor de los puntos con y sin algún tipo de afección, tal y como mostró el análisis de ANOVA. Si se intenta encontrar el día con mayor amplitud entre los valores de cada uno de los grados, se puede ver como ocurre en la fecha 17/05/2021 entre los grados de afección media y severa respecto a aquellos que no tienen afección; para el caso de la diferencia entre los puntos entre afección media y los puntos con afección severa, la fecha es el 24/09/2020.

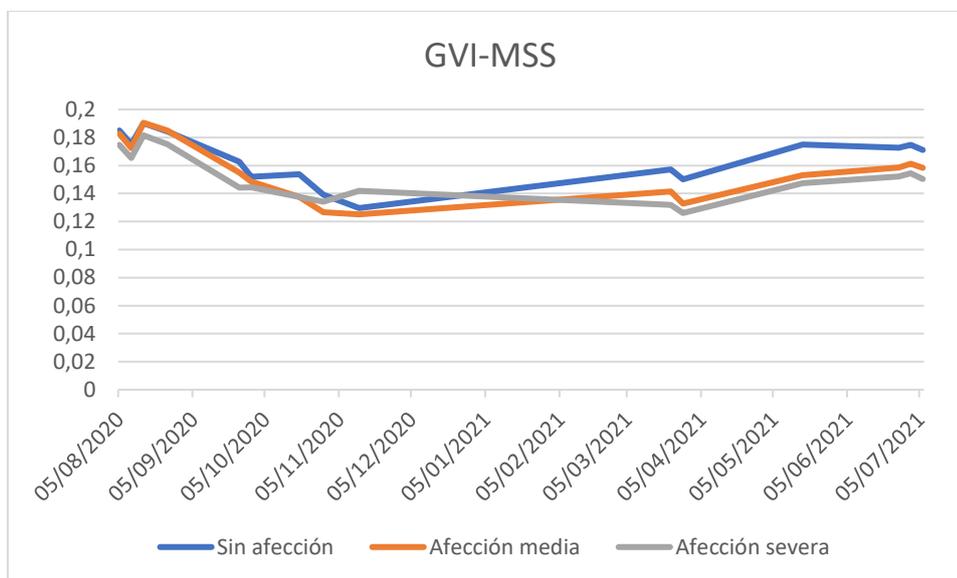


Figura 10: Evolución GVI-MSS entre el 05/08/2020 y 06/07/2021. Fuente: elaboración propia.

3.2.7. Tasseled Cap: GVI

Para el caso del otro componente de verdor de Tasseled Cap, el análisis realizado con ANOVA ha arrojado los siguientes valores: con un valor de $F = 2.732$ y un $Pr > F 0.11$, los valores de verdor entre los puntos no afectados y los que presentan una afección media no difieren de forma significativa entre ellos, igual que el siguiente caso en el que se comparan el verdor entre los puntos sin afección y aquellos con afección severa. El valor F es de 1.784 y el de $Pr > 0.192$. En el caso de los puntos con afección severa y los que presentan afección media, con unos valores de F de 0.019 y de $Pr > F$ de 0.891 , en verdad tampoco presenta una diferencia significativa como para tenerla en cuenta.

En la figura 11, se expresa mediante un gráfico de líneas los valores del verdor vegetal que registran los puntos clasificados en cada una de las afecciones. Al igual que su símil, los valores están bastante parejos entre todas las categorías, no vislumbrándose una clara diferenciación, tal y como ha indicado el análisis realizado anteriormente. La fecha en la que más distancia hay entre ellos es el 29/10/2020 en el caso de los puntos no afectados respecto a los que tienen una afección media; día 19/10/2020 para los puntos sin afección respecto a los afectados severamente y, por último, el día 06/07/2021 es en el que se registra el máximo entre los valores de afección severa y media.

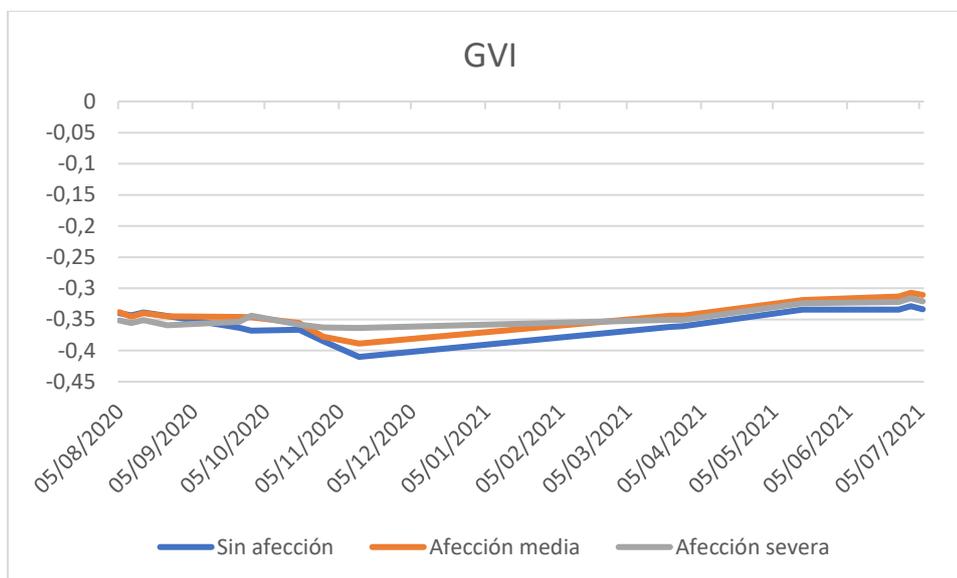


Figura 11: Evolución GVI entre el 05/08/2020 y 06/07/2021. Fuente: elaboración propia.

3.2.8. Tasseled Cap: WET

El último análisis ANOVA hecho es el relacionado con el componente de humedad o WET de Tasseled Cap. El primer resultado calculado es el que indicará si existe una diferencia entre el contenido de humedad de los puntos considerados como no afectados respecto a aquellos considerados con afección media. El valor F arroja un valor de 17.61, y un $Pr > F$ de 0.000248, lo cual demuestra que, efectivamente, sí hay una clara diferencia entre la humedad contenida en los puntos de una y otra categoría. Comparando los puntos sin afección con los que fueron clasificados como de severos, el valor F es de 24.31, con un $Pr > F$ de 0.0000335 señala inequívocamente que difiere del índice observado en las categorías. En el caso de los puntos con afección severa y media, el valor de humedad apenas varía de manera sustancial, ya que los valores obtenidos de $F = 0.905$ y $Pr > F = 0.35$ señalan lo contrario.

La gráfica de la figura 12 muestra la evolución de los valores de humedad de los puntos tomados por cada grado de afección a lo largo de la serie temporal. Se puede apreciar una clara diferencia entre la humedad de los puntos no afectados respecto a los demás grados, alcanzándose el valor máximo el día 17/05/2021 comparándolos con los puntos de afección media y para el día 23/03/2021 si se comparasen con los puntos de afección severa. En el caso de la diferencia máxima entre los puntos de afección media y severa, la fecha en la que más dista la cantidad de humedad entre ellos es el 29/10/2021.

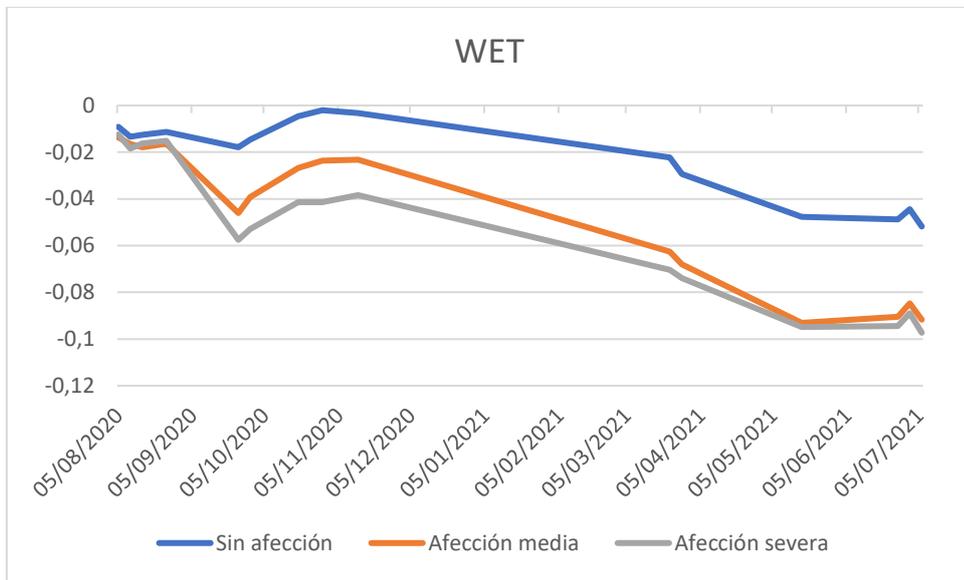


Figura 12: Evolución WET entre el 05/08/2020 y 06/07/2021. Fuente: elaboración propia.

4. Discusiones y conclusiones

Los resultados obtenidos a partir de la metodología empleada no han sido del todo los esperados, ya que, aunque sí que tiene una utilidad para poder diferenciar vegetación afectada de la que no ha sido dañada por el temporal, según el análisis estadístico realizado, no se ha conseguido identificar de manera óptima entre dos de los tres grados de afección propuestos.

La metodología empleada ha estado basada en otros estudios que sí han empleado algún índice de vegetación, como el NDVI o la aplicación de la transformación Tasseled Cap para determinar los daños causados por tornados sobre un área boscosa (Kingfield & de Beurs, 2017; Yuan et al., 2002), con resultados óptimos. Para el resto de los índices empleados, como el CCCI, SLAVI o el NBRi, no se han encontrado referencias para poder determinar si el cálculo de estos ha tenido un resultado satisfactorio en la monitorización de daños de este fenómeno. Así mismo, debido a la naturaleza de los llamados reventones o “downburst”, los cuales causan un daño en la vegetación similar al de los tornados (Gayà et al., 2011) y a que se sucedieron en la misma zona de estudio ambos fenómenos, también se ha creído conveniente emplear estos índices para intentar segregar la vegetación por el grado de afección. De hecho, para la estimación del daño causado por “downburst” también se han aplicado índices de vegetación como el NDVI, con resultados positivos, aunque teniendo en cuenta que, en este caso, vino acompañado de otro fenómeno de mayor magnitud, como es un huracán (Rodgers et al., 2009).

Los resultados han demostrado que, de los ocho índices empleados para intentar delimitar la zona afectada por el evento meteorológico extremo del 29 de agosto de 2020, ninguno ha cumplido con la premisa de poder graduar la afección en tres criterios. No se ha podido determinar qué técnica es la más adecuada para poder segregar la vegetación en los tres grados; sin embargo, los índices NDVI, NBRi, SLAVI y el componente de humedad de Tasseled Cap sí que han encontrado diferencias significativas entre aquellos puntos clasificados como “sin afección” de los otros que sí han sido afectados, ya sea media o severamente. De entre estos cuatro, el óptimo, es decir, los que registran más diferencia de valores entre los distintos grados de afección en términos relativos es el componente de humedad de Tasseled Cap. La diferencia de valor máximo se da el día 17/05/2020, con un 48,03% entre los puntos sin afección y los puntos con afección media. En el caso de los puntos sin afección y los puntos con afección severa, la diferencia entre los valores es de un 68,27% para el día 23/03/2021. Por lo tanto, aunque no se haya podido cumplir el objetivo principal, el estudio determina que es posible diferenciar entre los puntos que no han sido afectados por el evento meteorológico extremo de aquellos que sí han sido afectados, independientemente del grado de afección que se le ha otorgado, mediante el componente WET de Tasseled Cap.

La utilización de los índices NDVI y el componente de humedad de Tasseled Cap, como se ha comentado anteriormente, viene dado por el empleo de estos en otros estudios mencionados previamente. Sin embargo, pese a no tener el mejor resultado, los índices de NBRi y SLAVI han ofrecido también resultados interesantes. El índice, pese a ser pensado para monitorizar vegetación después de incendios, puede resultar útil, aunque no haya zonas quemadas ya que su fórmula calculada con la banda NIR, sensible a la vegetación, y el SWIR que es idóneo para detectar cambios de humedad en el suelo y en las plantas, permite detectar cambios en la actividad de la vegetación (CITA NBR). En el caso del SLAVI, el hecho de que no se haya cumplido la premisa principal puede deberse a varios motivos, por una parte, el muestreo realizado durante el trabajo de campo puede haber tenido algún fallo tanto en la toma de los datos como en la categorización de los grados de afección. La vegetación sana era fácil de reconocer, pues no había variado respecto al momento anterior del evento; sin embargo, el hecho de clasificar el resto de vegetación dañada como media o severa ha sido, por una parte, un trabajo subjetivo el valorar el daño que sufrió la vegetación, por lo

que, o quizá la clasificación no fue elaborada de manera idónea o la vegetación no tenía tantos niveles de destrucción como se pensaba.

Los índices que no han presentado diferencias significativas entre los grados de afección fueron el CCCI, SAVI, o los dos componentes de verdor de Tasseled Cap. En el caso del CCCI, a pesar de que no había precedentes en estudios que se aplicara este índice para detectar los daños causados por algún agente meteorológico, sí que ha sido utilizado para medir la evolución de, sobre todo, campos de cultivo a partir del contenido en clorofila de las especies vegetales (Cammarano et al., 2011; Fitzgerald et al., 2010). En el caso del índice SAVI, pese a presentar una mejora respecto al índice NDVI, ya que ayuda a mitigar el efecto del brillo del suelo, tampoco ha conseguido diferenciar entre las distintas afecciones de la vegetación. De hecho, con el empleo de este índice en otros estudios no se habían obtenido resultados tan satisfactorios como con otros índices utilizados como el NDVI (Kingfield & de Beurs, 2017; Yuan et al., 2002). En el caso de los componentes de verdor GVI y GVIMSS, pese a que este último ha brindado mejores resultados frente al GVI, ninguno de los dos ha conseguido tampoco que haya habido una diferenciación significativa entre los grados de afección de la vegetación.

Por lo tanto, pese a que los índices empleados para el análisis y delimitación del área afectada no hayan obtenido los resultados deseados, sí que se podría seguir con la misma línea de este mismo trabajo en un futuro. Se podrían emplear otros índices e indicadores relacionados con la vegetación que no han sido utilizados para este presente estudio como, por ejemplo, el índice EVI, el cual consiste en una mejora del NDVI, con una sensibilidad mayor para regiones con una cantidad de biomasa notable y una capacidad mejorada de monitoreo de la vegetación gracias a la reducción la influencia de la atmósfera (Karkauskaite et al., 2017).

En conclusión, la teledetección es un importante aliado a la hora de analizar, planificar y gestionar zonas naturales en las que se ha producido un fenómeno meteorológico extremo, como es el caso del estudiado en la Serra de Tramuntana. La ya de por sí afectación relativamente común de fenómenos como tornados y reventones en la isla, sumado al más que probable aumento de la ocurrencia y magnitud de estos en un futuro debido al cambio climático, da lugar a los ingredientes perfectos para la introducción en el Plan Forestal Balear del uso de la teledetección para tratar con este problema. Pese a no haber obtenido los resultados esperados, se ha podido comprobar el potencial que tienen estas herramientas gracias a la gran cantidad de técnicas e índices capaces de monitorizar el estado de la vegetación, al menos, diferenciando claramente entre la que ha sido afectada o dañada de la que se ha podido mantener sana, así como ver qué fecha es la más adecuada para la toma de las imágenes.

5. Bibliografía

- Azañón Hernández, J., y Mateos Ruiz, R. (2005a). Los movimientos de ladera en la Serra de Tramuntana de la isla de Mallorca: tipos, características y factores condicionantes. *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 18(1), 89–99.
- Azañón Hernández, J., y Mateos Ruiz, R. (2005b). Los movimientos de ladera en la Serra de Tramuntana de la isla de Mallorca: tipos, características y factores condicionantes. *Revista de La Sociedad Geológica de España*, 18(1), 89–99.
- Bazo, J., De la Torre, L., y Nieto, R. (2010). Ocurrencia de Depresiones Aisladas en Niveles Altos (DANAs) en el hemisferio norte desde principios del siglo XX. *Revista Avances En Ciencias de La Tierra*, 1, 147–156.
- Blanchard, D. O. (2013). A comparison of wind speed and forest damage associated with tornadoes in Northern Arizona. *Weather and Forecasting*, 28(2), 408–417. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-12-00046.1>
- De Bolòs i Capdevila, O. (1996). La vegetació de les Illes Balears. Barcelona: Institut d'Estudis Catalans.
- Burjachs, F., Pérez-Obiol, R., Roure, J. M., y Julia, R. (1994a). Dinámica de la vegetación durante el Holoceno en la isla de Mallorca. *Trabajos de Palinología Básica y Aplicada*, 1961, 199–210.
- Burjachs, F., Pérez-Obiol, R., Roure, J. M., y Julia, R. (1994b). Dinámica de la vegetación durante el Holoceno en la isla de Mallorca. *Trabajos de Palinología Básica y Aplicada*, 1961, 199–210.
- Cammarano, D., Fitzgerald, G., Basso, B., O'Leary, G., Chen, D., Grace, P., & Fiorentino, C. (2011). Use of the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) for remote estimation of wheat nitrogen content in rainfed environments. *Agronomy Journal*, 103(6), 1597–1603. <https://doi.org/10.2134/agronj2011.0124>
- Carlson, T. N., & Ripley, D. A. (1997). On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index. *Remote Sensing of Environment*, 62(3), 241–252. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(97\)00104-1](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(97)00104-1)
- Delegido, J., Tenjo, C., Ruiz-Verdú, A., Pereira-Sandoval, M., Pasqualott, N., Gibaja, G., Verrelst, J., Peña, R., Urrego, E. P., Borrás, J., Sanchis-Muñoz, J., Pezzola, A., Mosquera, Z., Quinto, Z., Gómez, J. J., y Moreno, J. (2016). Aplicaciones de Sentinel-2 a Estudios de vegetación y calidad de aguas continentales. *XVII Simposio Internacional En Percepción Remota y Sistemas de Información Geográfica (SELPER)*, November, 16.
- Fitzgerald, G., Rodriguez, D., & O'Leary, G. (2010). Measuring and predicting canopy nitrogen nutrition in wheat using a spectral index-The canopy chlorophyll content index (CCCI). *Field Crops Research*, 116(3), 318–324. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2010.01.010>
- Fujita, T. T. (1981). Tornadoes and downbursts in the context of generalized planetary scales. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 38(8), 1511–1534. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1981\)038<1511:TADITC>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1981)038<1511:TADITC>2.0.CO;2)
- Gandhi, G. M., Parthiban, S., Thummalu, N., & Christy, A. (2015). Ndvi: Vegetation Change Detection Using Remote Sensing and Gis - A Case Study of Vellore District. *Procedia Computer Science*, 57, 1199–1210. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>
- Gayà, M. (2011). Tornadoes and severe storms in Spain. *Atmospheric Research*, 100(4), 334–343. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.10.019>
- Gayà, M., Llasat, M. C., & Arús, J. (2011). Tornadoes and waterspouts in Catalonia (1950-2009). *Natural Hazards and Earth System Science*, 11(7), 1875–1883. <https://doi.org/10.5194/nhess-11-1875-2011>
- Gilabert, M. A., González-Piqueras, J., García-Haro, F. J., & Meliá, J. (2002). A generalized soil-adjusted vegetation index. *Remote Sensing of Environment*, 82(2–3), 303–310.

- [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00048-2](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00048-2)
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Greenberg, C. H., & McNab, W. H. (1998). Forest disturbance in hurricane-related downbursts in the Appalachian mountains of North Carolina. *Forest Ecology and Management*, 104(1–3), 179–191. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(97\)00246-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(97)00246-6)
- Grimalt-Gelabert, M., Alomar-Garau, G., & Martin-Vide, J. (2021). Synoptic causes of torrential rainfall in the balearic islands (1941–2010). *Atmosphere*, 12(8), 1–14. <https://doi.org/10.3390/atmos12081035>
- Grimalt-Gelabert, M., i Blázquez-Salom, M. (1989). El mapa de marjades de la Serra de Tramuntana de Mallorca. *Treballs de Geografia*, 42, 43–47.
- Hechavarría, R., y López, G. (2013). El bosque mediterráneo. *El Bosque Mediterráneo*, 53(9), 1689–1699.
- Hill, M. J. (2013). Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated SENTINEL 2 data for a North American transect. *Remote Sensing of Environment*, 137, 94–111. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.06.004>
- Homar, V., Gayà, M., & Ramis, C. (2001). A synoptic and mesoscale diagnosis of a tornado outbreak in the Balearic Islands. *Atmospheric Research*, 56(1–4), 31–55. [https://doi.org/10.1016/S0169-8095\(00\)00087-9](https://doi.org/10.1016/S0169-8095(00)00087-9)
- Huete, A. R. (1988). A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, 25, 295–309.
- Insaurrealde, J. A. (2019). Aplicación de la transformación Tasseled Cap en la generación de información temática a partir de las imágenes satelitales del Landsat 8 (OLI). *GeoFocus Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de La Información Geográfica*, 24, 19–35. <https://doi.org/10.21138/gf.587>
- Jansà, A. (2014). El clima de les Illes Balears. Palma: Leonard Muntaner.
- Ji, L., Zhang, L., Wylie, B. K., & Rover, J. (2011). On the terminology of the spectral vegetation index (NIR - SWIR)/(NIR+SWIR). *International Journal of Remote Sensing*, 32(21), 6901–6909. <https://doi.org/10.1080/01431161.2010.510811>
- Karkauskaite, P., Tagesson, T., & Fensholt, R. (2017). Evaluation of the plant phenology index (PPI), NDVI and EVI for start-of-season trend analysis of the Northern Hemisphere boreal zone. *Remote Sensing*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/rs9050485>
- Kauth, R. J. (1976). *Tasseled Cap - a Graphic Description of the Spectral-Temporal Development of Agricultural Crops As Seen By Landsat*. 41–51.
- Kingfield, D. M., & de Beurs, K. M. (2017). Landsat identification of Tornado damage by land cover and an evaluation of damage recovery in forests. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 56(4), 965–987. <https://doi.org/10.1175/JAMC-D-16-0228.1>
- Kramer, K., Leinonen, I., & Loustau, D. (2000). The importance of phenology for the evaluation of impact of climate change on growth of boreal, temperate and Mediterranean forests ecosystems: An overview. *International Journal of Biometeorology*, 44(2), 67–75. <https://doi.org/10.1007/s004840000066>
- Luna Ángeles, M. H. (2018). *Especificaciones Técnicas de la Transformación Tasseled Cap*. Tabla 1, 5.
- Lymburner, L., Beggs, P. J., & Jacobson, C. R. (2000). Estimation of canopy-average surface-specific leaf area using Landsat TM data. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 66(2),

- Maestre, F. T., & Cortina, J. (2004). Are *Pinus halepensis* plantations useful as a restoration tool in semiarid Mediterranean areas? *Forest Ecology and Management*, *198*(1–3), 303–317. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2004.05.040>
- Mateo-García, G., Gómez-Chova, L., Amorós-López, J., Muñoz-Marí, J., & Camps-Valls, G. (2018). Multitemporal cloud masking in the Google Earth Engine. *Remote Sensing*, *10*(7), 7–9. <https://doi.org/10.3390/rs10071079>
- Miglietta, M.M., Mazon, J., Motola, V., & Pasini, A. (2017). Effect of a positive Sea Surface Temperature anomaly on a Mediterranean tornadic supercell. *Scientific Reports*, *7*(1), 1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-13170-0>
- Nelson, B. W., Kapos, V., Adams, J. B., Oliveira, W. J., & Oscar, P. G. (2016). *Forest Disturbance by Large Blowdowns in the Brazilian Amazon Stable URL: http://www.jstor.org/stable/1941742 REFERENCES Linked references are available on JSTOR for this article: You may need to log in to JSTOR to access the linked references. Your us.* *75*(3), 853–858.
- Pastor, F., Estrela, M. J., Peñarrocha, D., & Millán, M.M. (2001). Torrential rains on the Spanish Mediterranean Coast: Modeling the effects of the sea surface temperature. *Journal of Applied Meteorology*, *40*(7), 1180–1195. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2001\)040<1180:TROTSM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2001)040<1180:TROTSM>2.0.CO;2)
- Peñuelas, J., Sardans, J., Filella, I., Estiarte, M., Llusià, J., Ogaya, R., Carnicer, J., Bartrons, M., Rivas-Ubach, A., Grau, O., Peguero, G., Margalef, O., Pla-Rabés, S., Stefanescu, C., Asensio, D., Preece, C., Liu, L., Verger, A., Barbeta, A., ... Terradas, J. (2017). Impacts of global change on Mediterranean forests and their services. *Forests*, *8*(12), 1–37. <https://doi.org/10.3390/f8120463>
- Pérez i Obiol, R., Yll, R., Pantaleón-Cano, J., y Roure, J. (1999a). Cambio climático y transformación del medio durante el Holoceno en las Islas Baleares. *Cambio Climático y Transformación Del Medio Durante El Holoceno En Las Islas Baleares*, *2*(2), 45–51.
- Pérez i Obiol, R., Yll, R., Pantaleón-Cano, J., y Roure, J. (1999b). Cambio climático y transformación del medio durante el Holoceno en las Islas Baleares. *Cambio Climático y Transformación Del Medio Durante El Holoceno En Las Islas Baleares*, *2*(2), 45–51.
- Peterson, C. J. (2000). Catastrophic wind damage to North American forests and the potential impact of climate change. *Science of the Total Environment*, *262*(3), 287–311. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(00\)00529-5](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(00)00529-5)
- Resco De Dios, V., Fischer, C., & Colinas, C. (2007). Climate change effects on mediterranean forests and preventive measures. *New Forests*, *33*(1), 29–40. <https://doi.org/10.1007/s11056-006-9011-x>
- Rodgers, J. C., Murrain, A. W., & Cooke, W. H. (2009). The impact of hurricane katrina on the coastal vegetation of the weeks bay reserve, alabama from NDVI data. *Estuaries and Coasts*, *32*(3), 496–507. <https://doi.org/10.1007/s12237-009-9138-z>
- Rodríguez, O., Bech, J., Arús, J., Castán, S., Figuerola, F., & Rigo, T. (2021). An overview of tornado and waterspout events in Catalonia (2000–2019). *Atmospheric Research*, *250*(December 2020), 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2020.105415>
- Rodríguez Perea, A. (1986). Megaturbiditas calcáreas en el Mioceno de Mallorca. Formación turbidítica de Banyalbufar. *Acta Geológica Hispánica*, *21*(1), 283–292.
- Romm, J. (2018). Extreme Weather and Climate Change. In *Climate Change*. <https://doi.org/10.1093/wentk/9780190866112.003.0002>
- Stott, P. (2016). How climate change affects extreme weather events. *Science*, *352*(6293), 1517–1518.

<https://doi.org/10.1126/science.aaf7271>

- Whitaker, R. (1998). El tiempo en acción. En Burroughs, W.J. (Ed.), *Observar el tiempo* (pp. 174-273). Barcelona: Editorial Planeta.
- Yuan, M., Dickens-Micozzi, M., & Magsig, M.A. (2002). Analysis of tornado damage tracks from the 3 May tornado outbreak using multispectral satellite imagery. *Weather and Forecasting*, *17*(3), 382–398. [https://doi.org/10.1175/1520-0434\(2002\)017<0382:AOTDTF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0434(2002)017<0382:AOTDTF>2.0.CO;2)

6. Anejo

Tabla 7: Datos NDVI por afección y fecha. Fuente: elaboración propia.

Fecha	Sin afección	Afección media	Afección severa
05/08/2020	0,704	0,691	0,704
10/08/2020	0,695	0,678	0,688
15/08/2020	0,749	0,739	0,750
25/08/2020	0,739	0,731	0,743
24/09/2020	0,708	0,618	0,584
29/09/2020	0,692	0,607	0,569
19/10/2020	0,689	0,576	0,571
29/10/2020	0,705	0,592	0,578
13/11/2020	0,709	0,589	0,571
23/03/2021	0,818	0,668	0,639
28/03/2021	0,720	0,577	0,541
17/05/2021	0,658	0,520	0,513
26/06/2021	0,646	0,530	0,523
01/07/2021	0,631	0,523	0,515
06/07/2021	0,648	0,531	0,521

Tabla 8: Datos SAVI por afección y fecha. Fuente: elaboración propia.

Fecha	Sin afección	Afección media	Afección severa
05/08/2020	0,390	0,386	0,378
10/08/2020	0,382	0,372	0,365
15/08/2020	0,410	0,406	0,397
25/08/2020	0,397	0,395	0,383
24/09/2020	0,361	0,335	0,306
29/09/2020	0,344	0,332	0,314
19/10/2020	0,352	0,306	0,297
29/10/2020	0,325	0,292	0,295
13/11/2020	0,286	0,267	0,288
23/03/2021	0,366	0,313	0,288
28/03/2021	0,352	0,298	0,282
17/05/2021	0,373	0,310	0,301
26/06/2021	0,366	0,319	0,308
01/07/2021	0,362	0,318	0,307
06/07/2021	0,365	0,320	0,305

Tabla 9: Datos NBRi por afección y fecha. Fuente: elaboración propia.

Fecha	Sin afección	Afección media	Afección severa
05/08/2020	0,574	0,554	0,566
10/08/2020	0,558	0,534	0,535
15/08/2020	0,588	0,565	0,578
25/08/2020	0,590	0,567	0,577
24/09/2020	0,540	0,429	0,385

29/09/2020	0,544	0,438	0,390
19/10/2020	0,569	0,453	0,408
29/10/2020	0,593	0,483	0,419
13/11/2020	0,560	0,449	0,414
23/03/2021	0,525	0,366	0,322
28/03/2021	0,490	0,332	0,303
17/05/2021	0,437	0,279	0,272
26/06/2021	0,431	0,295	0,280
01/07/2021	0,444	0,316	0,301
06/07/2021	0,428	0,298	0,276

Tabla 10: Datos CCCI por afección y fecha. Fuente: elaboración propia.

Fecha	Sin afección	Afección media	Afección severa
05/08/2020	0,616	0,604	0,603
10/08/2020	0,611	0,612	0,608
15/08/2020	0,591	0,591	0,585
25/08/2020	0,576	0,571	0,571
24/09/2020	0,652	0,649	0,653
29/09/2020	0,665	0,655	0,680
19/10/2020	0,701	0,708	0,708
29/10/2020	0,696	0,774	0,702
13/11/2020	0,742	0,740	0,723
23/03/2021	0,716	0,712	0,712
28/03/2021	0,721	0,715	0,719
17/05/2021	0,672	0,674	0,683
26/06/2021	0,652	0,667	0,673
01/07/2021	0,649	0,658	0,662
06/07/2021	0,645	0,661	0,672

Tabla 11: Datos SLAVI por afección y fecha. Fuente: elaboración propia.

Fecha	Sin afección	Afección media	Afección severa
05/08/2020	1,615	1,509	1,564
10/08/2020	1,533	1,461	1,480
15/08/2020	1,647	1,581	1,619
25/08/2020	1,604	1,539	1,589
24/09/2020	1,634	1,299	1,252
29/09/2020	1,610	1,290	1,239
19/10/2020	1,764	1,358	1,400
29/10/2020	1,848	1,356	1,440
13/11/2020	2,205	1,587	1,500
23/03/2021	1,689	1,216	1,151
28/03/2021	1,550	1,120	1,104
17/05/2021	1,366	1,020	1,032
26/06/2021	1,325	1,037	1,041
01/07/2021	1,334	1,058	1,058
06/07/2021	1,315	1,038	1,036

Tabla 12: Datos GVIMSS por afección y fecha. Fuente: elaboración propia.

Fecha	Sin afección	Afección media	Afección severa
05/08/2020	0,185	0,183	0,175
10/08/2020	0,175	0,172	0,165
15/08/2020	0,190	0,190	0,182
25/08/2020	0,184	0,185	0,175
24/09/2020	0,163	0,155	0,144
29/09/2020	0,152	0,148	0,144
19/10/2020	0,154	0,138	0,138
29/10/2020	0,139	0,127	0,134
13/11/2020	0,130	0,125	0,142
23/03/2021	0,157	0,141	0,132
28/03/2021	0,150	0,133	0,126
17/05/2021	0,175	0,153	0,147
26/06/2021	0,173	0,159	0,152
01/07/2021	0,175	0,161	0,154
06/07/2021	0,171	0,158	0,150

Tabla 13: Datos GVI por afección y fecha. Fuente: elaboración propia.

Fecha	Sin afección	Afección media	Afección severa
05/08/2020	-0,340	-0,338	-0,352
10/08/2020	-0,344	-0,346	-0,356
15/08/2020	-0,339	-0,340	-0,351
25/08/2020	-0,345	-0,345	-0,360
24/09/2020	-0,363	-0,346	-0,354
29/09/2020	-0,368	-0,346	-0,344
19/10/2020	-0,367	-0,356	-0,358
29/10/2020	-0,385	-0,378	-0,363
13/11/2020	-0,410	-0,389	-0,364
23/03/2021	-0,362	-0,344	-0,351
28/03/2021	-0,361	-0,344	-0,351
17/05/2021	-0,334	-0,319	-0,324
26/06/2021	-0,334	-0,313	-0,322
01/07/2021	-0,329	-0,307	-0,316
06/07/2021	-0,333	-0,311	-0,321

Tabla 14: Datos WET por afección y fecha. Fuente: elaboración propia.

Fecha	Sin afección	Afección media	Afección severa
05/08/2020	-0,009	-0,014	-0,012
10/08/2020	-0,013	-0,016	-0,018
15/08/2020	-0,013	-0,018	-0,016
25/08/2020	-0,011	-0,016	-0,015
24/09/2020	-0,018	-0,046	-0,057
29/09/2020	-0,015	-0,039	-0,053
19/10/2020	-0,005	-0,027	-0,041

29/10/2020	-0,002	-0,024	-0,041
13/11/2020	-0,003	-0,023	-0,038
23/03/2021	-0,022	-0,063	-0,070
28/03/2021	-0,029	-0,068	-0,074
17/05/2021	-0,048	-0,093	-0,095
26/06/2021	-0,049	-0,091	-0,094
01/07/2021	-0,044	-0,085	-0,089
06/07/2021	-0,052	-0,092	-0,097