

## CASO PRÁCTICO

# Cartografía de la afección y recuperación vegetal del incendio de Las Peñuelas en Moguer (Huelva) con imágenes satelitales. Año 2017

Vales, J.J.<sup>2\*</sup>, Pino, I.<sup>2</sup>, Granado, L.<sup>2</sup>, Prieto, R.<sup>2</sup>, Méndez, E.<sup>2</sup>, Rodríguez, M.<sup>1</sup>, Giménez de Azcárate, F.<sup>2</sup>, Ortega, E.<sup>1</sup>, Moreira, J.M.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Área de Información, Evaluación, Análisis Ambiental y Fondos Europeos. Secretaría General de Medio Ambiente, Agua y Cambio Climático. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible Junta de Andalucía (CAGPDS). Avda. Manuel Siurot, 50, 41071, Sevilla, España.

<sup>2</sup> Red de Información Ambiental de Andalucía (Rediam), Agencia de Medio Ambiente y Agua, Johan Gutenberg, 1, 41092, Sevilla, España.

---

**Resumen:** Conocer en profundidad los procesos de regeneración después de un incendio forestal es fundamental para afrontar las consecuencias adversas de éstos sobre el medio natural. En este contexto, la severidad del fuego constituye una variable crítica porque condiciona la respuesta del ecosistema en términos de regeneración vegetal y dinámica hidrogeomorfológica tras el incendio. Por tanto, su correcta evaluación es fundamental para la gestión de las zonas quemadas ya que permite priorizar las áreas de actuación y, por tanto, ayuda en la adopción de estrategias y medidas de recuperación. El área de trabajo está localizada en el paraje de Las Peñuelas (Huelva), donde tuvo lugar un gran incendio el 24 de junio de 2017 que afectó a unas 10 000 ha. La metodología se basó en el cálculo del índice espectral RBR (*Relativized Burn Ratio*) para la estimación de la severidad, y el índice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para la evaluación de la recuperación del vigor vegetal. Para el trabajo se utilizaron imágenes procedentes de los satélites Sentinel-2 y Pléiades, fotografías adquiridas mediante UAV (*Unmanned Aerial Vehicle*), y muestreos de campo. El resultado fue una cartografía donde se muestran los niveles de recuperación o retroceso de la vegetación afectada.

**Palabras clave:** incendio forestal, INFOCA (Incendios Forestales Comunidad Andaluza), área quemada, severidad del fuego, regeneración vegetal, RBR, NDVI.

## Damage Assessment and Recovery Mapping for the "Las Peñuelas" Wildfire, Moguer (Huelva). Satellite Imagery. Year 2017

**Abstract:** Deep knowledge of the regeneration processes after a forest fire is key to addressing their adverse environmental impacts, these are especially evident in the vegetation. In the post-fire environment context, the fire severity constitutes a critical variable that affects the ecosystem response in terms of vegetation recovery and hydrogeomorphological dynamics after the fire. Therefore, the severity accurate assessment is essential for the burned areas management because of it allows the identification of priority areas and, therefore, it helps to carry out recovery strategies and measures. The area of interest is located in the natural place of Las Peñuelas (Huelva), where a large fire took place on June 24, 2017 that affected almost 10 000 ha. The methodology was based on

**To cite this article:** Vales, J.J., Pino, I., Granado, L., Prieto, R., Méndez, E., Rodríguez, M., Giménez de Azcárate, F., Ortega, E., Moreira, J.M. 2020. Damage Assessment and Recovery Mapping for the "Las Peñuelas" Wildfire, Moguer (Huelva). Satellite Imagery. Year 2017. *Revista de Teledetección*, 57, 79-94. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13082>

\* Corresponding author: [juanj.vales@juntadeandalucia.es](mailto:juanj.vales@juntadeandalucia.es)

the calculation of the RBR (Relativized Burn Ratio) spectral index to estimate the severity of the fire, and the NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) index to evaluate the recovery of vegetal vigor. For the work, images from the Sentinel-2 and Pleiades satellites, images acquired by UAV (Unmanned Aerial Vehicle) and field samplings were used. The result was a cartography showing the levels of recovery or degradation of the affected vegetation.

**Key words:** forest fire, INFOCA, burned area, fire severity, recovery of the vegetation, RBR, NDVI.

---

## 1. Introducción

El estudio de los efectos que un incendio forestal genera en el medio ambiente puede realizarse mediante trabajo de campo y/o mediante el uso de imágenes procedentes de observaciones remotas. Esta última técnica y fuente de información permite cubrir en su totalidad y, en diferentes momentos, la superficie afectada por el fuego. Los sensores remotos registran información en las distintas longitudes de onda del espectro electromagnético, y a partir de las variaciones en las propiedades ópticas de la vegetación se pueden analizar diferentes fenómenos relacionados con el fuego, como el grado de afección de la vegetación y el grado de regeneración.

Así, la teledetección permite la caracterización de la superficie quemada según varios métodos (Dedios-Mimbela, 2006) para un ecosistema de bosque seco. Se ha utilizado ampliamente para determinar a diferentes escalas el nivel de severidad de los incendios (Key y Benson, 2005), la pérdida de cobertura vegetal (Miller y Yool, 2002) y la tasa de recuperación de las comunidades vegetales (Díaz-Delgado y Pons, 2003). Un elemento común dentro de este tipo de estudios es la utilización de información espectral con el diseño de índices con información de diferentes bandas espectrales que han demostrado tener niveles de correlación con parámetros biofísicos de la vegetación como la cantidad de biomasa, la actividad fotosintética, la productividad y el contenido hídrico (De Santis y Chuvieco, 2007).

Para la caracterización espectral de la vegetación quemada hay que considerar dos tipos diferentes de señal: la proveniente de la formación, deposición de carbón y cenizas consecuencia de la combustión de la vegetación, tiene el inconveniente de tener una corta duración en el tiempo, ya que se degrada por la acción de los agentes externos, que pueden eliminarlo a las pocas semanas o meses después de ocurrido el incendio; y la procedente

de la alteración de la estructura y cantidad de la vegetación, más estable, pero menos nítida para discriminar los efectos del fuego, puesto que otros factores pueden también causar cambios en la vegetación (Pereira et al., 1999).

En este contexto, y basado en experiencias previas sobre otros grandes incendios como el de Quesada en 2015 (Carpintero et al., 2017) se llevó a cabo una evaluación mediante teledetección, por considerarse una técnica adecuada que contribuye en gran medida al análisis de los incendios y las cubiertas vegetales afectadas, así como de sus efectos ecológicos, climáticos y atmosféricos (Justice et al., 1985; Roughgarden et al., 1991). Posteriormente, para obtener cartografía de superficies quemadas es común utilizar metodologías que se basan en el uso de imágenes de media resolución (Sentinel-2) para la obtención de la afección de la zona incendiada (De Santis et al., 2007), y la estimación de la regeneración vegetal (Granado et al., 2019; Pino et al., 2019).

Una metodología habitual para cartografiar la superficie quemada con técnicas de teledetección fue la comparación entre dos imágenes, una antes y otra después del incendio, mediante el método de diferencia entre bandas espectrales o índices de vegetación (Manzo-Delgado y López-García, 2013). El objeto de estos índices es realzar las diferencias espectrales de las zonas quemadas respecto a las demás cubiertas y análisis de la regeneración vegetal tras el incendio (Bastarrika et al., 2011; García-Martínez y Pérez-Cabello, 2015). Estudios precedentes demostraron el potencial de los índices espectrales para el estudio de los incendios por teledetección, como la Ratio Relativizada de Área Quemada (*Relativized Burn Ratio*; RBR) y el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (*Normalized Difference Vegetation Index*; NDVI) entre otros muchos (Fernández-Manso et al., 2016; Navarro et al., 2017). Estos índices de vegetación son

transformaciones que implican efectuar una combinación matemática entre los niveles digitales almacenados en dos o más bandas espectrales de la misma imagen (Esperanza y Zerda, 2002). Estos índices están condicionados por cambios en el estado fisiológico de las coberturas vegetales, y sus variaciones pueden ser utilizadas para estudios espaciotemporales del comportamiento de la vegetación. Con el RBR se estudiará el grado de severidad del incendio y con el NDVI la regeneración de la vegetación en los meses posteriores.

El presente artículo tiene por objeto describir los trabajos de obtención de información base, necesaria para elaborar el Plan de Gestión (Ley 5/1999, de 29 de junio) para la restauración del área afectada y la monitorización de la evolución de la misma, en cumplimiento de la obligatoriedad de garantizar las condiciones para la restauración de la vegetación de los terrenos forestales incendiados. Para ello se desarrollaron una serie de procesos destinados a obtener la superficie afectada por el incendio, evaluar la severidad del fuego y hacer un seguimiento del proceso de regeneración del ámbito afectado. Estos trabajos se enmarcaron por tanto en la fase de evaluación y análisis pos-emergencia.

## 2. Material y métodos

### 2.1. Características del área de estudio

El área de estudio es el incendio forestal del Paraje Las Peñuelas, en el término municipal de Moguer (Huelva), que afectó también a otros términos municipales de la provincia: Almonte, Lucena del Puerto y Palos de la Frontera.

El incendio se inició el sábado 24 de junio de 2017, a las 20:50 h y fue dado por estabilizado el 27 de junio por el dispositivo INFOCA (Informe ejecutivo del Incendio de Las Peñuelas). Desde el inicio del mismo los factores de propagación fueron las altas temperaturas y el viento de noroeste con fuerza de 20-25 km/h subiendo a 50 km/h, provocando focos secundarios por pavesas a 900 metros de distancia. El fuego afectó a dos espacios protegidos: el Parque Natural de Doñana (6761 ha) y el Paraje Natural Laguna de Palos y Las Madres (17 ha).

Dentro de la superficie recorrida por el fuego existen zonas de escasa afección y también zonas no forestales (edificaciones, cortafuegos, vías de circulación, cultivos,...). En total, el fuego dañó 9856,64 ha forestales, en un 80% formaciones de matorral con pino o pinar denso.

El área afectada se encuentra en la región biogeográfica mediterránea, caracterizada por elevada insolación, inviernos suaves y pequeña oscilación térmica. La precipitación media anual es de 461,5 mm con aridez estival. Los vientos dominantes son de dirección suroeste, favoreciendo una alta humedad.

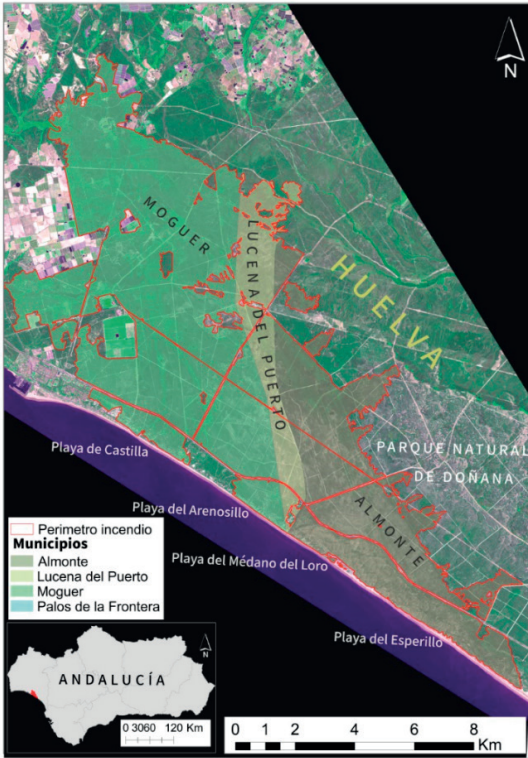
Se trata de una gran planicie que antes de alcanzar el mar, se eleva en una enorme duna: el Médano del Asperillo, con cotas que alcanzan los 100 m de altura, y termina abruptamente en un acantilado. Es un territorio caracterizado por la esterilidad de su sustrato, prácticamente sílice, su movilidad y su dificultad para retener el agua.

A grandes rasgos, pueden diferenciarse en la zona 4 sistemas fisiográficos: acantilados y dunas, riberas y vaguadas, mantos eólicos y dunas estabilizadas, y arenas basales y glaciais.

En el área quemada dominaba una importante masa forestal de pinar de pino piñonero y albergaba numerosas especies singulares como la *Armenia velutina* o la *Linaria tursica*, así como 17 Hábitats de Interés Comunitario (HIC), todos ellos con la categoría de prioritarios o propuestos como prioritarios para Andalucía: estanques temporales en dunas y arenas litorales, dunas costeras fijas con vegetación herbácea, y brezales atlánticos en dunas y arenas litorales descalcificadas.

#### 2.1.1. Cuantificación de la superficie afectada

La evaluación general de la superficie afectada por el fuego en el incendio de Las Peñuelas (Moguer) se ha realizado empleando una ortofotografía Pléiades de alta resolución (0,5 m) tomada el día 29 de junio de 2017, cinco días después de la declaración del mismo y cuando ya se encontraba estabilizado. Tras el análisis de la misma y la digitalización de la zona afectada por el fuego (Figura 1), el perímetro más preciso del área afectada por el incendio, y que se adopta como tal, da un resultado de 10 344,40 ha (Tabla 1).

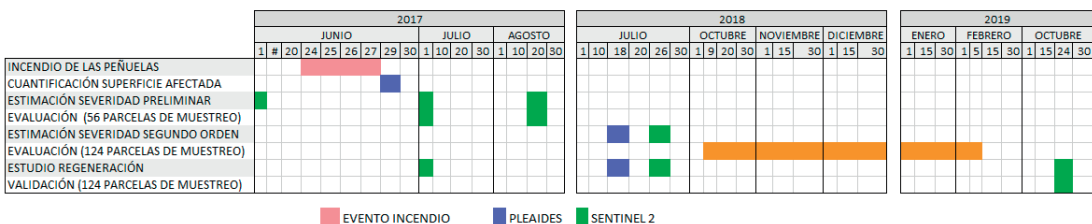


**Figura 1.** Delimitación de la superficie afectada por el incendio de Las Peñuelas, y por términos municipales, sobre ortoimagen Pléiades de 29/06/2017.

**Tabla 1.** Superficie afectada por términos municipales.

| Municipios*          | Superficie afectada (ha) | % Superficie total afectada | % sobre superficie municipal |
|----------------------|--------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Palos de la Frontera | 1,51                     | 0,01                        | 0,03                         |
| Lucena del Puerto    | 1038,68                  | 10,05                       | 14,97                        |
| Almonte              | 3174,11                  | 30,68                       | 3,68                         |
| Moguer               | 6130,09                  | 59,26                       | 30,07                        |
| Total                | 10344,40                 | 100                         |                              |

**Tabla 2.** Cronología uso de imágenes y datos.



## 2.2. Imágenes y procesamiento

Para el presente estudio se han utilizado imágenes de muy alta resolución Pléiades e imágenes del satélite Sentinel-2. Los satélites Pléiades 1A y Pléiades 1B suministran productos ópticos en muy alta resolución con una capacidad de revisita diaria sobre cualquier punto del globo, por lo que son especialmente adecuados para la respuesta de emergencia. Poseen una resolución espacial 0,5 m en pancromático y de 2 m para imágenes multispectrales. El producto adquirido fue imágenes ortorectificadas (*Pansharpened* 4 bandas RGB-IR, resolución 0,5 m). Los satélites Sentinel-2 tienen una alta periodicidad de revisita y media resolución espacial, ofreciendo 13 bandas espectrales con una resolución de 10, 20 y 60 m. Estas imágenes fueron obtenidas con nivel de procesado 1C y se procesaron para liberarlas de alteraciones atmosféricas o presencia de nubes, proceso necesario en algunos estudios como los análisis multitemporales o la comparación de índices de vegetación. El método usado para ello fue el conocido como *DOS-Dark Object Subtraction* o SPO-Método de sustracción de píxeles oscuros, en el que se asume que, si hay áreas en una imagen con valores muy bajos de reflectancia, cualquier reflectancia aparente debería ser producto de la dispersión (*scattering*) atmosférica y esta información puede ser utilizada para calibrar el resto de la imagen (Chávez, 1996).

En la Tabla 2 se muestra la cronología de la monitorización de los efectos del incendio con teledetección.

## 2.3. Estimación de la severidad

Se lleva a cabo una primera evaluación de la severidad del fuego mediante técnicas de teledetección, dado que la aplicación de índices de severidad calculados a partir de imágenes de



satélite permite realizar una evaluación rápida sobre extensas superficies, tener acceso a información de zonas poco accesibles y permite repetir la evaluación para comparar otras zonas o épocas, todo ello con unos costes asumibles (Key y Benson, 2006).

Las áreas totalmente quemadas generan una reflectancia espectral diferente frente a las no afectadas. La mayoría de los estudios usan índices espectrales obtenidos por medio de diferentes combinaciones de bandas (Montorio et al., 2014). En este caso se decidió aplicar el índice de severidad RBR (*Relativized Burn Ratio*) (Ecuación 1) (Parks et al., 2014), por ser un índice con mayor sensibilidad a cambios en las zonas incendiadas cuya cobertura vegetativa previa al fuego es baja, como en este caso ocurría en la zona dunar.

$$RBR = \frac{dNBR}{(NBR_{pre} + 1,001)} \quad (1)$$

donde,  $dNBR = (NBR_{pre} - NBR_{post})$  y  $NBR = \frac{(R_{nir} - R_{swir})}{(R_{nir} + R_{swir})}$  y donde,  $R_{nir}$  (banda 8 Sentinel2) y  $R_{swir}$  (banda 12 Sentinel2), son las reflectividades en las regiones del infrarrojo cercano y onda corta.

Para trabajar con este índice y según la metodología propuesta por Key y Benson (2005) se necesitan dos imágenes, una previa al incendio y otra posterior. Para ello, se seleccionaron las imágenes del satélite Sentinel-2 del 1 de junio de 2017 (pre-incendio) y 1 de julio de 2017 (post-incendio), fechas muy próximas entre sí minimizando de esta forma los cambios en la fenología de la vegetación que pudieran repercutir en dicho índice. Debido a la extensión del incendio, los trabajos de campo se dividieron en dos fases (julio y agosto/septiembre). Para evitar posibles cambios fenológicos en la vegetación que pudieran haber ocurrido en la segunda fase de trabajo de campo se calculó una nueva imagen de RBR, pero esta vez con la imagen post-incendio (20/08/2017).

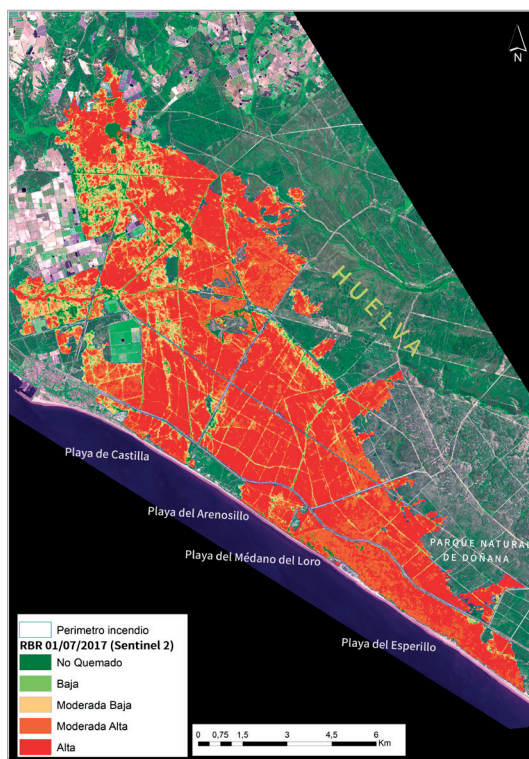
Para la clasificación de estas imágenes en niveles de severidad, se utilizaron los umbrales de clasificación que suelen encontrarse en la bibliografía especializada (Key y Benson, 2006; Miller y Thodei, 2007). Aunque son valores obtenidos bajo condiciones específicas son utilizados como una primera aproximación al cálculo de la extensión del incendio. Una vez obtenidos los

valores del índice por píxel afectado por el fuego, se agrupan en intervalos de severidad, para la verificación posterior de resultados (fase de validación) (Tabla 3).

Se definieron los umbrales de corte para cada categoría atendiendo a su grado de severidad, con los criterios detallados en la (Figura 2).

**Tabla 3.** Umbrales de clasificación de la severidad.

| Clases | Umbrales (valor píxel) | Denominación  |
|--------|------------------------|---------------|
| 1      | $RBR < 0,07$           | no quemado    |
| 2      | $0,07 < RBR < 0,13$    | baja          |
| 3      | $0,13 < RBR < 0,22$    | moderada baja |
| 4      | $0,22 < RBR < 0,32$    | moderada alta |
| 5      | $RBR > 0,22$           | alta          |



**Figura 2.** Cartografía de severidad a partir del RBR sobre imagen Sentinel-2 del 01/07/2017.

Las categorías de severidad definidas (no quemado, baja, moderada-baja, moderada-alta y alta) fueron las identificadas en las parcelas de muestreo.

### 2.3.1. Evaluación en campo

Tras la obtención de la imagen RBR, se llevó a cabo un trabajo de campo para analizar la correspondencia entre los resultados de las clasificaciones de ambas fechas post-incendio y la verdad-terreno.

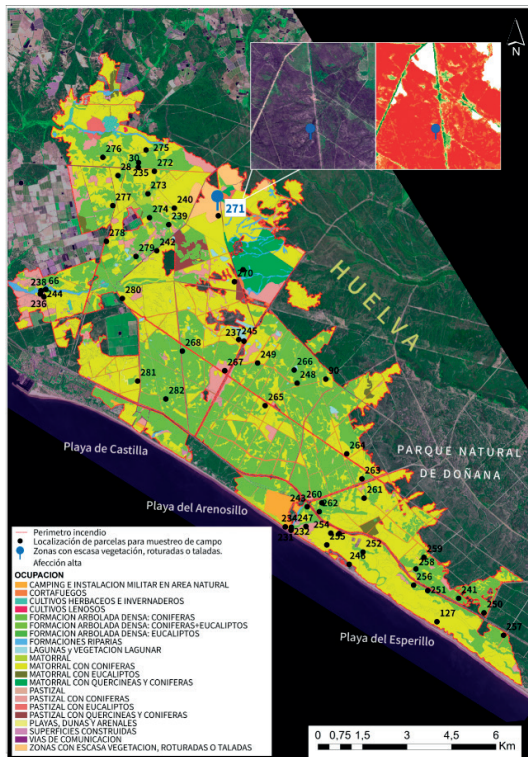
Durante el periodo estival de 2017 se realizaron las campañas de observación en campo en la zona afectada por el incendio. El monitoreo de la vegetación quemada fue difícil de abordar mediante mediciones en terreno en esta etapa, debido a la gran magnitud del área incendiada. Se seleccionaron un total de 56 parcelas de muestreo intentando recoger toda la variabilidad de la zona. Se tuvieron en consideración determinados rangos de NDVI previo para controlar la cobertura y densidad de la vegetación, la cartografía de severidad post-incendio y la cartografía de cobertura vegetal pre-incendio SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo de España o SIPNA) (Figura 3).

El tamaño y ubicación de la parcela se tomó con relación a la accesibilidad y homogeneidad presentes en el paisaje siniestrado estableciendo, como principio de muestreo, la autocorrelación espacial donde se visualiza que los valores de los píxeles vecinos son similares.

En este trabajo se propuso como método de campo para evaluar la gravedad del incendio el *Composit Burn Index* (CBI) (Key y Benson, 2005), ya que proporciona un índice de severidad semicuantitativo que facilita la validación estadística de las estimaciones derivadas de los datos cuantitativos de sensores remotos.

Se basa en la evaluación de diferentes variables asociadas con efectos del fuego en diferentes estratos del ámbito afectado: sustrato (material tendido en el suelo); hierbas, arbustos cortos y árboles pequeños (<1 m de altura); arbustos altos y árboles jóvenes (<5 m de alto); árboles intermedios (5-20 m de altura); y árboles grandes (>20 m de altura). El CBI final para cada parcela se estimó tras la inspección visual como promedio de los estratos presentes en esa parcela. La escala propuesta de CBI va de 0 (sin daño) a 4 (máximo daño), considerando: A, Severidad nula: no quemado; B, Baja severidad: predominio de vegetación y suelo en áreas no quemadas; C, Niveles medios de severidad: aparición de vegetación quemada, suelo y presencia de carbón (se evalúa la proporción de

copas consumida; D, Severidad alta: combustión completa, presencia de la ceniza).



**Figura 3.** Ocupación del suelo en el perímetro incendiado (SIOSE, 2014). Localización de los puntos de muestreo en campo. Se muestra detalle de la parcela 271 sobre imagen Pléiades del 29/06/2017 y cartografía de severidad de la zona con Sentinel-2 del 01/07/2017.

### 2.3.2. Validación y ajustes de los niveles de severidad preliminar

La verificación de los resultados se realizó comparando los resultados de clasificación para el índice RBR (para ambas fechas post-incendio) con los valores de severidad obtenidos en campo para las 56 parcelas. El análisis estadístico de esos pares de observaciones (realidad-resultado) permitió generar la matriz de confusión y calcular la fiabilidad global, la fiabilidad de usuario y del productor e índice Kappa para ambas fechas post-incendio. El índice Kappa mide el nivel de acuerdo entre la clasificación realizada y la verdad-terreno tomando valores entre -1 y 1, correspondiendo el máximo acuerdo con valores cercanos a 1 y un grado de acuerdo menor al que se obtendría puramente al azar para valores menores o iguales a 0 (Fleiss, Cohen y Everitt, 1969).

## 2.4. Estimación de la severidad de segundo orden

Tras la primera evaluación de la severidad del fuego, encaminada a localizar los daños de primer orden vinculados al impacto inmediato sobre las condiciones preexistentes, se llevó a cabo una evaluación de segundo orden con el objetivo de observar efectos de primer orden no visibles justo después del fuego, como la mortalidad de la vegetación o la regeneración vegetal si la hubiera. El intervalo de tiempo para la medición de la severidad del fuego es relativamente corto, y se diferencian dos evaluaciones, una evaluación inicial, en la que se clasifican los niveles de carbonización (Key, 2006) y la evaluación de segundo orden, que no se aconseja antes de la primera estación de crecimiento de la vegetación.

Para el análisis de la severidad de segundo orden se utilizó la información de las imágenes Sentinel-2 nivel 1C pre-incendio (01/06/2017) y post-incendio (26/07/2018), corregidas atmosféricamente por el método DOS-*Dark Object Subtraction*, ya mencionado anteriormente. Se calculó la ratio relativizada RBR (*Relativized Burn Ratio*), dividiendo el dNBR por un ajuste del NBR pre-incendio (Parks et al., 2014) como así se indica en la evaluación inicial, dando continuidad temporal al análisis. En la estimación de la severidad de segundo orden, por tanto, se aplicaron los niveles de severidad de primer orden del incendio ya definidos en la primera fase (Figura 4).

Además, se adquirió una imagen Pléiades (18/07/2018), con la que se apoyaría el análisis de la serie Sentinel.

### 2.4.1. Evaluación en campo

Para realizar validación y control de los resultados, se decidió usar fotografías aéreas cenitales desde UAV (Unmanned Aerial Vehicle). La validez del uso de fotografías aéreas como fuente de información alternativa a la metodología clásica de observación directa de los niveles de daños, como por ejemplo el CBI (Key y Benson, 2006), está ampliamente documentada (Stehman y Czaplewski, 1998; Cansler y McKenzie, 2012; Quintano et al., 2013). Estas fotografías se tomaron con una cámara compacta Sony DSC-HX60, con un sensor CMOS Exmor R de 20,4 megapíxeles, provista de una lente G de Sony con zoom óptico de 30×,

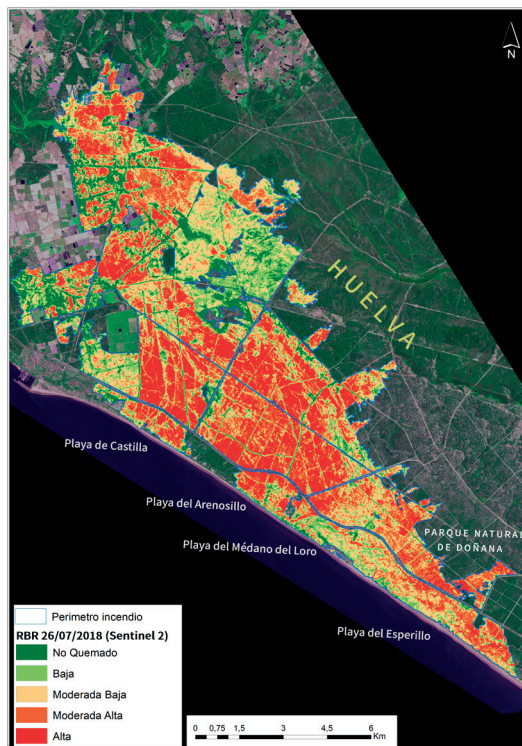


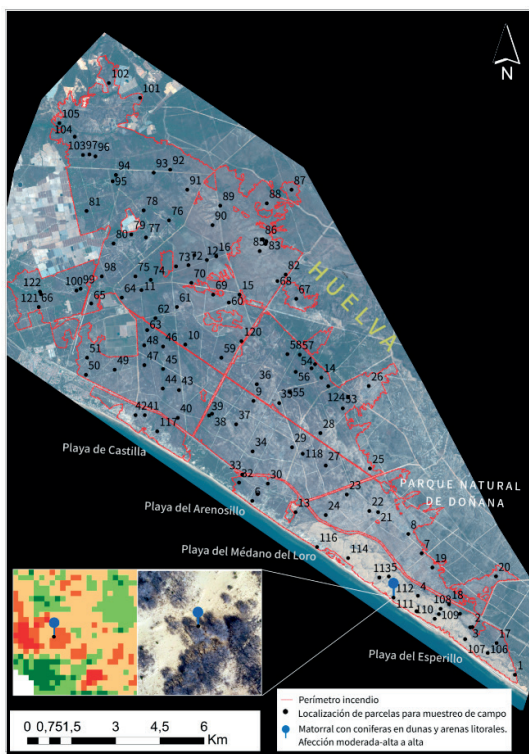
Figura 4. Cartografía de severidad a partir del RBR de la imagen Sentinel-2 del 26/07/2018.

sistema de enfoque automático con detección de contraste y sensibilidad ISO de 100 a 12 800.

Se parte de una red de 124 parcelas de muestreo bien distribuida y con una representación más amplia que la utilizada en la fase inicial. Se trataba de puntos de muestreo elegidos sobre el mapa de la zona afectada sobre el que se superpuso una malla poligonal, de manera que se obtuvieran los puntos potenciales para la toma de datos. La elección de estos puntos de muestreo se realizó teniendo presente criterios de accesibilidad y representatividad. Se trató de un muestreo dirigido, sin valor probabilístico, pero con una mayor eficiencia que el sistemático cuando el tiempo disponible para el trabajo es escaso. Así, para la ubicación de las parcelas a muestrear, se tuvieron en cuenta los siguientes factores: el número de parcelas (1 por cada 100 ha) distribuidas atendiendo a grado de afectación de las distintas unidades ambientales; y localizadas con apoyo del inventario de vegetación (Mapa de Vegetación de Andalucía).



La fotografía de cada parcela se realizó a una altura aproximada de 120 m para cubrir totalmente el área de la misma con 20 m de radio y con una orientación de captura al Norte. Mediante esta orientación y los datos de posicionamiento GPS se realizó un proceso de georreferenciación aproximada de cada foto al Norte. Se utilizó un sensor RGB ya que por limitaciones de disponibilidad de medios técnicos no fue posible el uso de un sensor multiespectral, el cual habría sido más fácil de relacionar con la información multiespectral de Sentinel. La fotointerpretación se realizó por un técnico especialista que evaluó la severidad general en el punto, en función del grado de afectación del estrato con mayor desarrollo (Figura 5), siguiendo las recomendaciones generales que dan Key y Benson (2006) para el caso del CBI.



**Figura 5.** Localización de los puntos de muestreo sobre imagen Pléiades del 18/07/2018. Se muestra detalle de la parcela 112 sobre fotografía aérea cenital desde UAV del 09/10/2018 y cartografía de severidad de la zona con Sentinel-2 del 26/07/2018.

La campaña de observación con UAV no pudo realizarse simultáneamente a la captura de la imagen Sentinel utilizada para la determinación de los niveles de severidad de segundo orden, se realizó

unos meses después (09/10/2018- 05/02/2019). Lo adecuado hubiera sido llevar a cabo las capturas en fechas cercanas, no obstante, la principal característica de la vegetación observada en este intervalo de tiempo fue el agostamiento del estrato herbáceo mantenido desde el verano, permitiendo la diferenciación de la vegetación del estrato arbóreo y arbustivo, fundamental para la adecuada evaluación de la dinámica de la cubierta vegetal en términos de cobertura.

#### 2.4.2. Validación y ajustes de los niveles de severidad de segundo orden

A cada parcela de muestreo se le asignó la clase de severidad observada en las fotografías aéreas y el valor que le correspondía del índice RBR. El análisis estadístico de esos pares de observaciones permitió estimar numéricamente el grado de acuerdo esperado. La herramienta estadística en la que se fundamentó esta comparación es la matriz de confusión, calculando la fiabilidad global, la fiabilidad de usuario y del productor e índice Kappa.

### 2.5. Estudio de regeneración vegetal

Para la evaluación del grado de recuperación o degradación del área incendiada se lleva a cabo un análisis multitemporal definido por un escenario a corto plazo, justo un año después de producirse el incendio.

Como datos de análisis se utilizaron las imágenes Sentinel-2 de 01/07/2017 y 26/07/2018 (post-incendio) y el apoyo de una imagen Pléiades del 18/07/2018, que facilitó la interpretación del análisis.

El grado de regeneración en la zona afectada por el incendio fue evaluado analizando el índice de vegetación NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) de las imágenes Sentinel-2. A partir de los índices de verdor (NDVI) se genera una imagen de diferencias para conocer de manera sintética la variabilidad espacial de la intensidad y sentido de la recuperación vegetal. La idoneidad del NDVI para este tipo de estudio se debe a la respuesta general del índice a la cantidad de biomasa verde presente en la zona, independientemente de las especies vegetales (Blackburh y Milton 1995; Gamon et al. 1995). La respuesta del NDVI se satura cuando la vegetación alcanza el cien por cien



de recubrimiento, lo que lo habilita para seguir los estudios iniciales de la recuperación vegetal después de un incendio forestal.

Aplicando indicadores espectrales de anomalías de NDVI, es decir diferencia de NDVI (dNDVI) entre la imagen más cercana al incendio (NDVIi) y la imagen de la zona un año después de éste (NDVIa)  $[NDVIa - NDVIi]$ , se obtuvieron las tendencias positivas y negativas seguidas por la vegetación afectada respecto del nivel de severidad inicial asignado. En tal caso, es necesario tener en cuenta la compatibilidad fenológica entre las fechas de adquisición de las dos imágenes, a fin de minimizar la ocurrencia de falsos positivos/negativos (Escuín et al., 2008).

La imagen de diferencia de NDVI fue reclasificada en un número manejable e interpretable de clases, cuyos umbrales fueron definidos a partir de sumar y restar la desviación estándar a la media de sus valores. Este método ha sido utilizado para la clasificación de variables continuas y aplicado a índices espectrales en general y al NDVI en el contexto de estudios de incendios forestales en particular (Escuín et al., 2008).

En la evaluación de la respuesta de la vegetación se decidió priorizar el análisis de especies leñosas, dado que tienen efectos más estables sobre la regeneración del medio natural. Para ello, se utilizó la imagen Pléiades (2 m) de julio de 2018 que proporcionó información más precisa en cuanto a distribución espacial de la vegetación, facilitando el acomodamiento de los resultados obtenidos con la serie de imágenes Sentinel-2.

De lo anterior resultaron siete niveles (Tabla 4).

**Tabla 4.** Umbrales de clasificación de la regeneración vegetal.

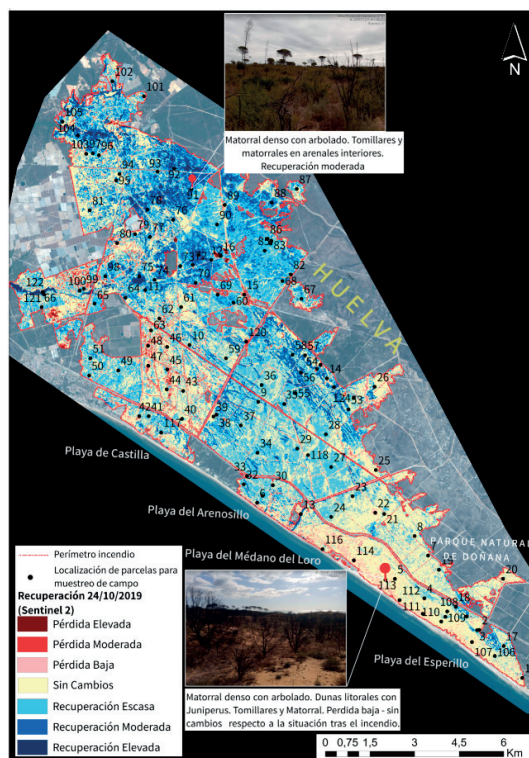
| Clases | Umbrales (valor píxel)  | Denominación          |
|--------|-------------------------|-----------------------|
| 1      | $dNDVI < -0,06$         | pérdida elevada       |
| 2      | $-0,06 < dNDVI < -0,01$ | pérdida moderada      |
| 3      | $-0,01 < dNDVI < 0,02$  | pérdida baja          |
| 4      | $0,02 < dNDVI < 0,09$   | sin cambios           |
| 5      | $0,09 < dNDVI < 0,17$   | recuperación baja     |
| 6      | $0,17 < dNDVI < 0,23$   | recuperación moderada |
| 7      | $dNDVI > 0,23$          | recuperación elevada  |

### 2.5.1. Validación de los niveles de recuperación y degradación vegetal

Para la validación de los resultados preliminares se contó con la aportación de técnicos y auxiliares

del Espacio Natural Doñana que, a partir de su conocimiento del estado del entorno y la interpretación visual de la información, evaluaron los niveles de regeneración visibles en las imágenes, alcanzando un alto nivel de confianza ya que no se identificaron errores durante el control. A pesar de que no se pudieron realizar inferencias basadas en grados de significación probabilística, sí dio una idea bastante aproximada de la situación en el área afectada por el incendio una vez transcurrido un periodo de tiempo de un año después del fuego.

A finales de 2019, con motivo de la puesta en marcha de las acciones recogidas en el Plan de Restauración de los montes públicos afectados por el incendio forestal de Las Peñuelas 2017, aprobado en dicho año, se llevó a cabo un muestreo para reportar el estado de evolución del entorno. Se visitaron las parcelas ya definidas con anterioridad para la validación del mapa de afección. Se trataba de 124 parcelas que comprendían la variabilidad del área recorrida por el fuego. Entre la



**Figura 6.** Cartografía de regeneración vegetal sobre imagen Sentinel-2 del 24/10/2019. Se muestra detalle de la parcela 92 y 113 a partir de fotografía *in-situ* tomada durante la campaña de campo de 2019.

información recabada por los técnicos se recogió el grado de regeneración general en cada punto observado y material fotográfico *in-situ* con orientación norte-sureste-oeste de cada parcela.

Los datos obtenidos en campo permitieron evaluar la calidad de la clasificación realizada mediante técnicas de teledetección de los niveles de regeneración vegetal, a partir de los valores obtenidos del cálculo de dNDVI de las imágenes Sentinel-2 de las fechas 01/07/2017 y 24/10/2019, imagen, esta última, cercana a la toma de información en campo (Figura 6).

Se llevó a cabo un análisis estadístico de los pares de nivel de regeneración observado en campo – valor del índice dNDVI. La precisión de la clasificación desarrollada se obtuvo a través de una matriz de confusión que sirvió para estimar el grado de acuerdo, calculando la fiabilidad global, la fiabilidad de usuario y del productor e índice Kappa.

### 3. Resultados

Respecto a la evaluación de la severidad de primer orden, la fiabilidad de las clasificaciones varió en función de las fechas post-incendio y el número de parcelas que intervinieron en cada resultado.

Para la fecha 1/07/2017 (se visitaron 24 parcelas) (Tabla 5) se consiguió una fiabilidad global del 61,69%, y un estadístico kappa de 0,46 en la clasificación de severidad a partir del RBR. Se observa la máxima exactitud en las clases 4 y 5, que ocupan en torno al 77% de la superficie incendiada.

**Tabla 5.** Severidad 2017. Matriz de confusión del ajuste (Sentinel-2 01/07/2017 – Campaña de campo 25/07/2017). Se visitaron 24 parcelas de muestreo representativas de los diferentes niveles de severidad (sev).

| IM severidad 01/07/2017 | VERDAD TERRENO. Muestras |      |      |      |       |
|-------------------------|--------------------------|------|------|------|-------|
|                         | sev2                     | sev3 | sev4 | sev5 | total |
| sev2                    | 74                       | 0    | 7    | 0    | 14    |
| sev3                    | 26                       | 55   | 11   | 14   | 19    |
| sev4                    | 0                        | 45   | 60   | 26   | 32    |
| sev5                    | 0                        | 0    | 22   | 60   | 35    |
| total                   | 100                      | 100  | 100  | 100  | 100   |

| Clase                 | Error comision (%) | Error omision (%) |
|-----------------------|--------------------|-------------------|
| sev2                  | 10,71              | 26,47             |
| sev3                  | 71,79              | 45,00             |
| sev4                  | 57,14              | 40,00             |
| sev5                  | 14,08              | 40,20             |
| Fiabilidad Global     | 61,69 %            |                   |
| Coefficiente de Kappa | 0,46               |                   |

**Tabla 6.** Severidad 2017. Matriz de confusión del ajuste (Sentinel-2 20/08/2017 – Campaña de campo 18/08- 06/09/2017). Se visitaron 32 parcelas de muestreo representativas de los diferentes niveles de severidad (sev).

| IM severidad 20/08/2017 | VERDAD TERRENO. Muestras |      |      |      |      |       |
|-------------------------|--------------------------|------|------|------|------|-------|
|                         | sev1                     | sev2 | sev3 | sev4 | sev5 | total |
| Unclassified            | 55                       | 0    | 0    | 0    | 0    | 3     |
| sev1                    | 39                       | 22   | 1    | 0    | 0    | 4     |
| sev2                    | 6                        | 67   | 9    | 0    | 0    | 8     |
| sev3                    | 0                        | 11   | 85   | 2    | 0    | 31    |
| sev4                    | 0                        | 0    | 6    | 92   | 2    | 22    |
| sev5                    | 0                        | 0    | 0    | 6    | 98   | 32    |
| Total                   | 100                      | 100  | 100  | 100  | 100  | 100   |

| Clase                 | Error comision (%) | Error omision (%) |
|-----------------------|--------------------|-------------------|
| sev1                  | 41,67              | 61,11             |
| sev2                  | 45,45              | 33,33             |
| sev3                  | 3,30               | 15,38             |
| sev4                  | 12,12              | 7,94              |
| sev5                  | 4,30               | 2,20              |
| Fiabilidad Global     | 86,39 %            |                   |
| Coefficiente de Kappa | 0,82               |                   |

La clase de severidad 1 no interviene debido a que no tiene representación, y la clase 2 y 3 muestran el menor acierto y corresponden con clases con poca representación.

Para la fecha 20/08/2017 (se visitaron 32 parcelas) (Tabla 6), se consiguió una fiabilidad global del 86,39% y un estadístico kappa de 0,82 en la clasificación de severidad a partir del RBR. La segunda clasificación muestra un porcentaje de acierto muy elevado en las clases 3, 4 y 5, siendo la clase 1 y 2 las de menor acierto, también destaca una menor representación.

En cuanto a los resultados globales de ambas clasificaciones se observa que las clases de severidad 1 y 2 muestran una alta confusión con la clase posterior, lo que supone una subestimación de la severidad, coincidente con zonas donde la cantidad de biomasa consumida mostraba una distribución dispersa. En este caso el grado de mortalidad inducida por el fuego no reflejaba la realidad sobre el terreno, impidiendo por tanto la cuantificación de severidad real, a pesar de que se trataba de zonas donde la vegetación se había visto afectada.

Estas zonas poco vegetadas, donde el modelo no expresa exactamente el grado de afectación de la vegetación, se han identificado utilizando el NDVI derivado de la imagen Sentinel de fecha 01/06/2017, encuadrándose las mismas mediante asignación visual en el nivel de afectación moderado alto. Así, el porcentaje de superficie afectada por niveles de severidad causados por el fuego se muestra a continuación (Tabla 7).

**Tabla 7.** Porcentaje de superficie afectada por niveles de severidad. Cartografía de severidad a partir del RBR sobre imagen Sentinel-2 del 01/07/2017.

| Clases | Denominación  | % sobre superficie total afectada |
|--------|---------------|-----------------------------------|
| 1      | No quemado    | 4,13                              |
| 2      | Baja          | 5,54                              |
| 3      | Moderada baja | 13,6                              |
| 4      | Moderada alta | 29,54                             |
| 5      | Alta          | 47,19                             |
|        | Total         | 100                               |

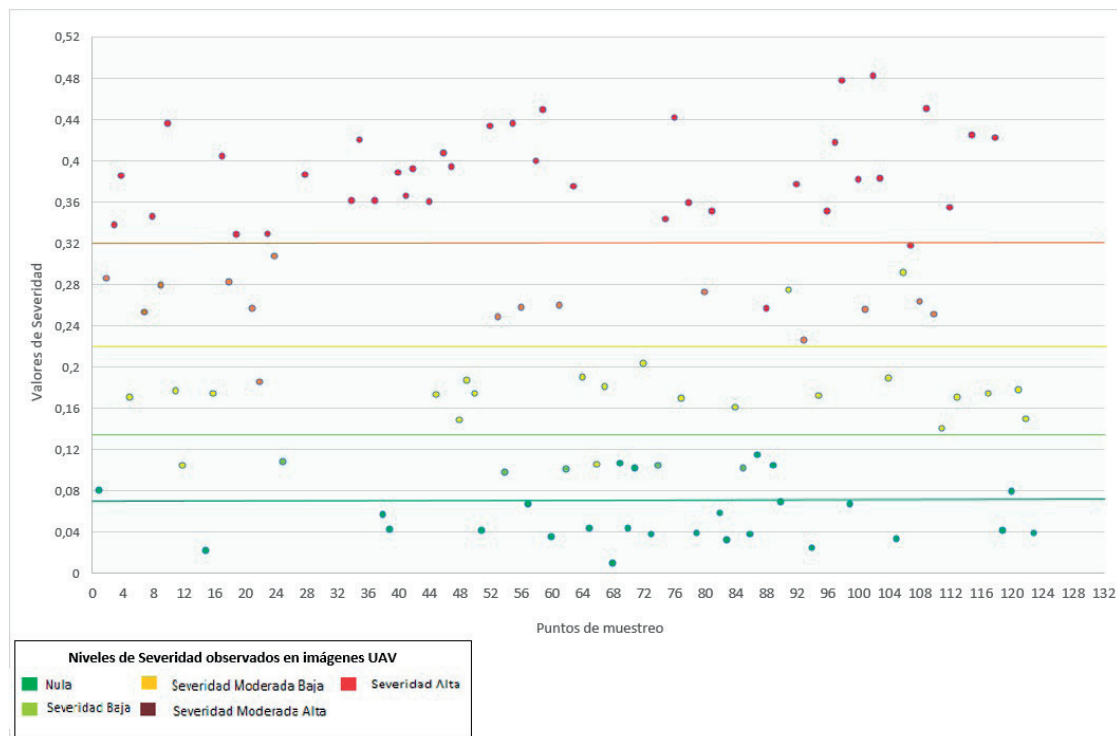
En el análisis de la severidad de segundo orden, la resolución de las imágenes aportadas por el UAV (en torno a 1,5 cm) permitió realizar una buena fotointerpretación del grado de afección, sobre todo en las clases de severidad nula (1) y baja (2) en aquellos estratos de vegetación dispersa y con poco desarrollo (baja FCC y sin arbolado), donde el RBR con imágenes Sentinel se mostró menos sensible a cambios y donde el efecto del suelo enmascaraba la respuesta de la vegetación impidiendo por tanto la cuantificación de la severidad.

En la siguiente gráfica (Figura 7) se puede observar la distribución de los puntos de muestreo en

función del RBR calculado a partir de las imágenes Sentinel-2 de 29/07/2018 y coloreados según el nivel de afección observado en las imágenes proporcionadas por el UAV. Las líneas de corte muestran los umbrales establecidos en el mapa de severidad a partir del RBR. Como se puede observar, solo en 11 puntos (de 108) el valor de severidad observada no es igual al valor estimado con la imagen. Se han excluido del estudio 16 puntos de muestreo por no tener datos de observación en campo.

Se consiguió una fiabilidad del 79,38%. En la clasificación se observan los menores aciertos en las clases 2 y 3. La clase 2 muestra una alta confusión con la clase 1; la clase 3 muestra confusión con la clase anterior y posterior (Tabla 8). La máxima exactitud se observa en las clases 4 y 5, nivel de severidad moderada alta y alta, que corresponden con bosques de pinos maduros.

Estos bosques de pinos maduros están desarrollados sobre dunas estabilizadas de la parte más interna del sistema dunar litoral, formados por *Pinus pinea*, (o también *P. pinaster* o *P. halepensis*), a menudo procedentes de repoblaciones



**Figura 7.** Distribución de los puntos de muestreo. Representación niveles de severidad imagen Sentinel-2 de 2018 / imágenes UAV de 2018, el eje x representa los puntos de muestreo y el eje y los valores de severidad.



antiguas, acompañados de diferentes especies de matorral (*camarina*, *sabina*, *lentisco*). El efecto del fuego sobre esta especie fue devastador. El pino piñonero no sobrevive al fuego, y sus semillas pierden la capacidad de germinar sometidas a altas temperaturas, aunque no se quemen, por lo que no tienen capacidad natural de regeneración.

La superficie afectada por niveles de severidad causados por el fuego se muestra en la Tabla 9.

En cuanto a la evaluación de la regeneración vegetal a partir de la dNDVI, el resultado fue una cartografía de los niveles de recuperación o pérdida del vigor de la vegetación dos años después del evento. Los cambios oscilaron entre aquella vegetación que mostraba un retroceso en el vigor vegetativo, situada en la zona de dunas litorales que englobaba los bosquetes de enebros y sabinas costeros, así como zonas de dunas con bosque de pinos maduros donde el efecto del fuego fue devastador, con valores de dNDVI inferiores a 0,02, y vegetación vigorosa en zonas de matorrales esclerófilos que mostraba recuperación, con valores de dNDVI superiores a 0,09.

En la gráfica que sigue (Figura 8) se muestra la distribución de los puntos de muestreo en función del dNDVI y coloreados según el nivel de regeneración observado en campo. Las líneas de corte muestran los umbrales establecidos en la cartografía de regeneración. Se han representado 108 puntos, en 2 de ellos el valor de regeneración observada difiere del valor estimado con la imagen. Se han excluido del estudio 16 puntos de

muestreo por falta de información recogida en el muestreo de campo correspondiente en su mayoría con zonas de pérdida elevada y moderada.

En cuanto a la fiabilidad del ajuste, los menores aciertos se observan en la clase 7 (recuperación alta) que muestra confusión con la clase anterior. No se pudo constatar el ajuste en la clase inferior correspondiente a pérdida alta, debido a la imposibilidad de visitar las parcelas de campo en esas zonas. Atendiendo a la matriz del ajuste (Tabla 10) se ha conseguido una precisión general del 98,08%, con una concordancia de 0,97.

#### 4. Conclusión

Concluir que la metodología propuesta en este trabajo, basada en la combinación de los trabajos de campo y las imágenes de satélite, supone una primera aproximación al estudio de la evolución del estado de la vegetación después de un incendio desde una perspectiva instrumental que facilite su interpretación y seguimiento para la toma de decisiones.

Los índices RBR y dNBR presentan resultados relativamente fiables para la evaluación espacial de la severidad del incendio de las Peñuelas y para la valoración de la evolución de los daños ocasionados por el fuego. No obstante, dicha fiabilidad pasa inevitablemente por un reconocimiento del terreno y conocimiento de las respuestas al fuego de los ecosistemas, que permita una correcta definición previa de las clases de severidad para mejorar la fase de entrenamiento dentro del proceso de

**Tabla 8.** Severidad 2018. Matriz de confusión del ajuste (Sentinel-2 26/07/2018 – Campaña con UAV 09/10/2018-05/02/2019). Se visitaron 108 parcelas de muestreo representativas de los diferentes niveles de severidad (sev).

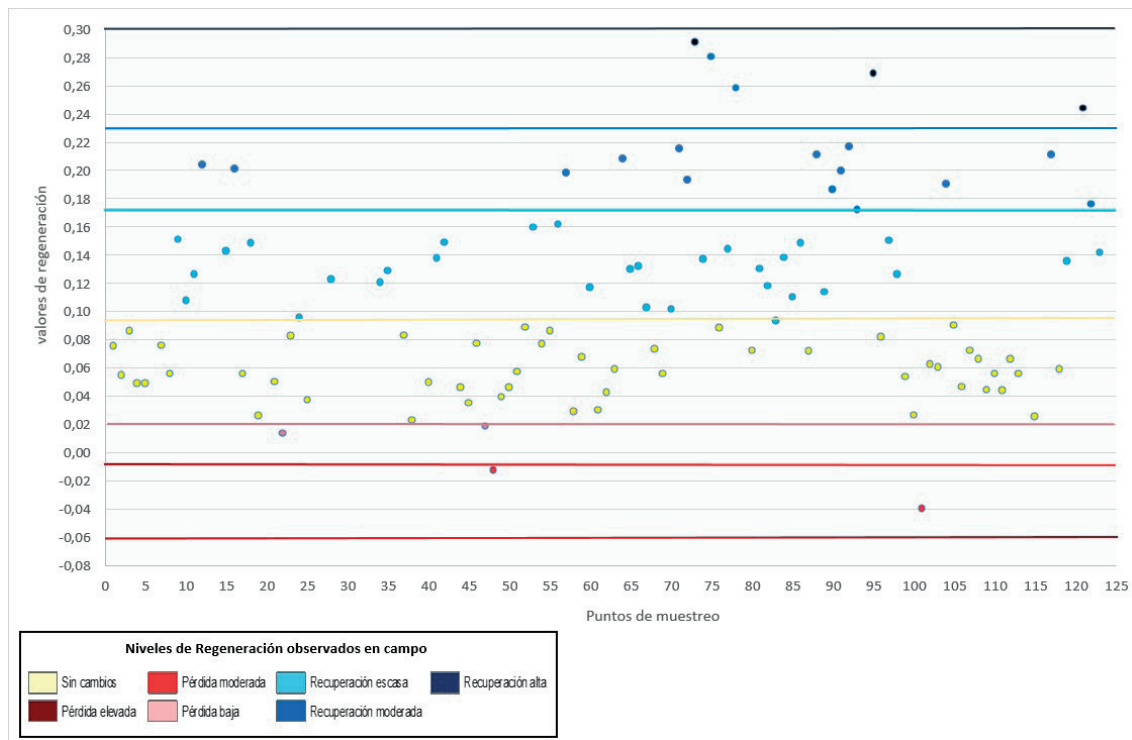
| IM SEVERIDAD | VERDAD TERRENO. Muestras |      |      |      |      |        |
|--------------|--------------------------|------|------|------|------|--------|
|              | sev1                     | sev2 | sev3 | sev4 | sev5 | total  |
| sev1         | 71                       | 4    | 2    | 0    | 0    | 17     |
| sev2         | 24                       | 86   | 17   | 0    | 0    | 14     |
| sev3         | 4                        | 10   | 70   | 14   | 0    | 19     |
| sev4         | 1                        | 0    | 12   | 82   | 11   | 18     |
| sev5         | 0                        | 0    | 0    | 4    | 89   | 32     |
| total        | 100                      | 100  | 100  | 100  | 100  | 100,00 |

| Clase                 | Error comision (%) | Error omision (%) |
|-----------------------|--------------------|-------------------|
| sev1                  | 3,50               | 28,87             |
| sev2                  | 65,16              | 14,14             |
| sev3                  | 18,86              | 30,15             |
| sev4                  | 36,74              | 18,18             |
| sev5                  | 1,81               | 11,40             |
| Fiabilidad Global     | 79,38 %            |                   |
| Coefficiente de Kappa | 0,73               |                   |

**Tabla 9.** Superficie afectada por niveles de severidad.

| Clases | Denominación  | Superficie afectada (ha) 01/07/2017 | Superficie afectada (ha) 26/07/2018 |
|--------|---------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| 1      | No quemado    | 426,89                              | 1158,35                             |
| 2      | Baja          | 573,08                              | 1744,57                             |
| 3      | Moderada baja | 1406,83                             | 3111,47                             |
| 4      | Moderada alta | 3055,74                             | 2348,58                             |
| 5      | Alta          | 4881,86                             | 1981,43                             |
|        | Total         | 10344,40                            | 10344,40                            |



**Figura 8.** Distribución de los puntos de muestreo. Representación niveles de regeneración imagen Sentinel-2 de 2019 / puntos de muestreo campaña 2019, el eje x representa los puntos de muestreo y el eje y los valores de regeneración.

**Tabla 10.** Regeneración 2019. (Sentinel-2 24/10/2019 – Campaña de campo 09/10- 15/11/2019). Se visitaron 108 parcelas de muestreo representativas de los diferentes niveles de regeneración vegetal (reg).

| IM REGENERACION | VERDAD TERRENO. Muestras |      |      |      |      |      |       |
|-----------------|--------------------------|------|------|------|------|------|-------|
|                 | reg4                     | reg2 | reg1 | reg5 | reg6 | reg7 | total |
| reg4            | 100                      | 0    | 0    | 0    | 0    | 0    | 50    |
| reg2            | 0                        | 100  | 0    | 0    | 0    | 0    | 2     |
| reg3            | 0                        | 0    | 100  | 0    | 0    | 0    | 2     |
| reg5            | 0                        | 0    | 0    | 100  | 0    | 0    | 29    |
| reg6            | 0                        | 0    | 0    | 0    | 88   | 0    | 14    |
| reg7            | 0                        | 0    | 0    | 0    | 13   | 100  | 4     |
| Total           | 100                      | 100  | 100  | 100  | 100  | 100  | 100   |

| Clase                 | Error comision (%) | Error omision (%) |
|-----------------------|--------------------|-------------------|
| reg4                  | 0,00               | 0,00              |
| reg2                  | 0,00               | 0,00              |
| reg3                  | 0,00               | 0,00              |
| reg5                  | 0,00               | 0,00              |
| reg6                  | 0,00               | 12,50             |
| reg7                  | 40,00              | 0,00              |
| Fiabilidad Global     | 98,08 %            |                   |
| Coefficiente de Kappa | 0,97               |                   |

clasificación. Se deben continuar los estudios en la zona a fin de implementar un protocolo que facilite el trabajo de los gestores, incluyendo la evaluación a largo plazo de la severidad mediante técnicas de teledetección que permitan calcular vulnerabilidad y resiliencia de los ecosistemas (Malak et al., 2015, Doblas-Miranda et al., 2015).

Desde el punto de vista de la administración responsable de la gestión y restauración de los ecosistemas forestales, los resultados obtenidos han proporcionado una herramienta útil para la toma de decisiones urgentes, seguimiento de la evolución del ámbito afectado y la definición del Plan de Restauración del entorno para la priorización de las actuaciones a acometer.

En la ejecución de este trabajo se han combinado diversas técnicas para la captura de información geográfica, en función de las necesidades de precisión y resolución requeridas para la ejecución de las distintas fases. El uso de imágenes del satélite Sentinel-2 ha supuesto una importante contribución y avance en el ámbito del análisis de los incendios forestales, al proporcionar datos de libre distribución, así como por el significativo incremento en resolución espacial, espectral y temporal, proporcionando una mejor calidad de análisis debido a la mejora de la resolución espacial, en comparación a la resolución espacial de otros satélites. La mejor resolución espectral y radiométrica también han supuesto un gran

avance reduciendo las posibles confusiones entre categorías en el momento de la clasificación, y la resolución temporal ha proporcionado mayor número de imágenes en un plazo de tiempo más corto (5 días considerando los satélites Sentinel-2A y 2B), lo que posibilita obtener información más próxima en el tiempo a la monitorización ambiental. El trabajo de campo realizado ha constatado la importancia de poder trabajar con imágenes lo más cercanas posibles en el tiempo a la alteración producida.

Por otro lado, el uso de imágenes UAV ha permitido realizar un seguimiento a la carta de los efectos del incendio, realizando vuelos post-incendio de parcelas de muestreo seleccionadas en zonas que se vieron afectadas por el mismo, por tanto, su uso complementa notablemente la información sobre las zonas quemadas y su regeneración.

Por último, el uso de imágenes Pléiades ha permitido gracias a las características óptimas de resolución espacial (0,5 m), una buena discriminación de coberturas para la delimitación del área afectada por el incendio, además al contar con una banda en el infrarrojo cercano ha permitido realizar combinaciones de bandas que han sido útiles para la verificación de resultados en distintas fases del estudio.

## Agradecimientos

En el marco de los trabajos del Grupo de Trabajo Científico-Técnico encargado de la restauración del incendio de “Las Peñuelas” 2017, este artículo ha sido posible gracias a la colaboración del Espacio Natural de Doñana, por su contribución en la recogida de datos en las distintas campañas de campo y sus aportaciones técnicas en relación con el conocimiento exhaustivo del ámbito afectado. Por otro lado, agradecemos a AMAYA y La Caixa la aportación de información procedente de la campaña de campo con dron. También queremos agradecer a AIRBUS Defence and Space su colaboración en la optimización de procesos operativos y administrativos para la adquisición de imágenes Pléiades por parte de Rediam.

## Referencias

- Bastarrika, A., Chuvieco, E., Martín, M.P. 2011. Mapping burned areas from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: balancing omission and commission errors. *Remote Sens. Environ.*, 115, 1003-1012. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.12.005>
- Blackburn, G.A., Milton, E.J. 1995. Seasonal variations in the spectral reflectance of deciduous tree canopies. *International Journal of Remote Sensing*, 16, 709-720. <https://doi.org/10.1080/01431169508954435>
- Cansler, C.A., McKenzie, D. 2012. How Robust Are Burn Severity Indices When Applied in a New Region? Evaluation of Alternate Field-Based and Remote-Sensing Methods. *Remote Sensing*, 4(12), 456-483. <https://doi.org/10.3390/rs4020456>
- Carpintero, I., Montoya, G., Granado, L., Méndez, E., Pino, I., Prieto, R., Vales, J.J., Salas, F.J., Venegas, J., Cáceres, F., Moreira, J.M., Giménez de Azcárate, F. 2017. Cartografía de la afección del incendio en Huesa, Quesada y Cabra de Santo Cristo (Jaén) con imágenes satelitales. Nuevas plataformas y sensores aplicados a la gestión del Agua, la Agricultura y el Medio Ambiente. *XVII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*, 181-184.
- Chavez, P.S. Jr. 1996. Image-based atmospheric corrections—revisited and revised. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 62(9):1025-1036.
- Chuvieco, E., Riaño, D., Danson, F.M., Martín, P. 2006. Use of radiative transfer model to simulate the postfire spectral response to burn severity. *Journal of Geophysical Research*, 111. <https://doi.org/10.1029/2005JG000143>
- Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Informe ejecutivo del incendio de Las Peñuelas Moguer (Huelva).
- De Santis, A., Chuvieco, E. 2007. Burn severity estimation from remotely sensed data: Performance of simulation versus empirical models. *Remote Sensing of Environment*, 108(4), 422-435. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.11.022>
- Dedios-Mimbela N.J. 2006. Análisis de diferentes métodos de clasificación de una imagen de satélite para caracterizar la superficie afectada por incendio forestal en ecosistemas de bosque. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología SENAMHI.
- Díaz-Delgado, R., Pons, X. 2003. Análisis comparativo de diferentes cartografías de incendios forestales. *Revista de Teledetección*, 20, 11-15.



- Doblas-Miranda, E., Martínez-Vilalta, J., Lloret, F., Álvarez, A., Ávila, A., Bonet, F.J., Brotons, L., Castro, J., Curiel Yuste, J., Díaz, M., Ferrandis, P., García-Hurtado, E., Iriondo, J.M., Keenan, T.F., Latron, J., Llusà, J., Loepfe, L., Mayol, M., Moré, G., Moya, D., Peñuelas, J., Pons, X., Poyatos, R., Sardans, J., Sus, O., Vallejo, V.R., Vayreda, J., Retana, J. 2015. Reassessing global change research priorities in mediterranean terrestrial ecosystems: how far have we come and where do we go from here? *Global Ecology and Biogeography*, 24(1), 25-43. <https://doi.org/10.1111/geb.12224>
- Escuin, S., Navarro, R., Fernández, P. 2008. Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images, *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 1053-1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>
- Fleiss, J.L., Cohen, J., Everitt, B.S. 1969. Large sample standard errors of kappa and wighted kappa. *Psychological Bulletin*, 72, 323-327. <https://doi.org/10.1037/h0028106>
- Gamon, J.A., Field, C.B., Goulden, M.L., Griffin, K.L., Hartley, A.E., Joel, G., Peñuelas, J., Valentini, R. 1995. Relationships between NDVI, canopy, structure and photosynthesis in three Californian vegetation types. *Ecological Applications*, 5, 28-41. <https://doi.org/10.2307/1942049>
- García-Martínez, E., Pérez-Cabello, F. 2015. Análisis de la regeneración vegetal mediante imágenes Landsat-8 y el producto MCD15A2 de MODIS: el caso del incendio de O Pindo (Galicia). En *Análisis espacial y representación geográfica: innovación y aplicación*. Universidad de Zaragoza - AGE (2015): 621-630.
- Granado, L., Pino, I., Vales, J.J., Prieto, R., Méndez, E., Rodríguez, M., Giménez de Azcárate, F., Ortega, E., Moreira, J.M. 2019. Cartografía de la recuperación vegetal del incendio de Las Peñuelas en Moguer (Huelva) con imágenes satelitales. En *Hacia una visión del cambio climático. XVIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección*. Valladolid, España, 24-27 septiembre. pp. 155-158. ISBN: 978-84-1320-038-5.
- Junta de Andalucía. Boletín Oficial de la Junta de Andalucía. Ley 5/1999, de 29 de junio, de Prevención y Lucha contra los Incendios Forestales. <https://juntadeandalucia.es/boja/1999/82/1>
- Justice, C.O., Townshend, J.R.G., Holben, B.N., Tucker, E.C. 1985. Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, 6, 1271-1318. <https://doi.org/10.1080/01431168508948281>
- Key, C.H., Benson, N. 2005. Landscape assessment: ground measure of severity, the Composite Burn Index; and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. Fort Collins, CO: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.
- Key, C.H. 2006. Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity. *Fire Ecology*, 2, 34-59. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0202034>
- Malak, D.A., Pausas, J.G., Pardo-Pascual, J.E., Ruiz, L.A. 2015. Fire Recurrence and the Dynamics of the Enhanced Vegetation Index in a Mediterranean Ecosystem. *International Journal of Applied Geospatial Research*, 6(2), 18-35. <https://doi.org/10.4018/ijagr.2015040102>
- Manzo-Delgado, L., López-García, J. 2013. Detección de áreas quemadas en el sureste de México, utilizando índices pre y post-incendio NBR y BAI, derivados de compuestos MODIS”, *GeoFocus*, 13(2), 66-83. ISSN: 1578- 5157.
- Miller, J.D., Yool, S.R. 2002. Mapping forest post-fire canopy consumption in several overstory types using multi-temporal Landsat TM and ETM data. *Remote Sensing of Environment*, 82, 481-496. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00071-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00071-8)
- Montorio, R., Pérez-Cabello, F., García-Martín, A., Vlassova, L., de la Riva-Fernández, J. 2014. La severidad del fuego: Revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. En: José Arnáez, Penélope González-Sampériz, Teodoro Lasanta y Blas L. Valero Garcés (eds.). *Geoecología, cambio ambiental y paisaje: homenaje al profesor José María García Ruiz*. Logroño: Instituto Pirenaico de Ecología (CSIC): Universidad de La Rioja, España.
- Parks, S.A., Dillon, G.K., Miller, C. 2014. A new metric for Quantifying burn severity: The relativized burn ratio. *Remote Sensing*, 6, 1827-1844. <https://doi.org/10.3390/rs6031827>
- Pereira, J.M.C., Sa, A.C.L., Sousa, A.M.O., Silva, J.M.N., Santos, T.N., Carreiras, J.M.B. 1999. Spectral characterisation and discrimination of burnt areas. In: E. Chuvieco (Ed.). *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Springer-Verlag, Berlin. 123-138. [https://doi.org/10.1007/978-3-642-60164-4\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-642-60164-4_7)
- Plan de restauración de los montes públicos afectados por el incendio forestal de Las Peñuelas 2017: sector occidental del Parque Natural de Doñana, Coto Mazagón y ordenados de Moguer. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. Junta de Andalucía. Septiembre 2019.

- Quintano, C., Fernández-Manso, A., Roberts, D.A. 2013. Multiple Endmember Spectral Mixture Analysis (MESMA) to map burn severity levels from Landsat images in Mediterranean countries. *Remote Sensing of Environment*, 136, 76-88. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2013.04.017>
- Roughgarden, J.S.W., Running, S.W., Matson, P.A. 1991. What does remote sensing do for ecology? *Ecology*, 72, 1918-1922. <https://doi.org/10.2307/1941546>
- Stehman, S. V, Czaplewski, R.L. 1998. Design and Analysis for Thematic Map Accuracy Assessment - an application of satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 64, 331-344. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00010-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00010-8)