



8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

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



8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya - 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Análisis de la problemática de los incendios forestales en torno a la Reserva Transfronteriza de la Biosfera Xurés

RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, F.¹, LORENZO CIMADEVILA, H.¹, ÁLVAREZ BERMÚDEZ, X.¹ y RECONDO GONZÁLEZ, C.²

¹ Departamento de Ingeniería de los Recursos Naturales y Medio Ambiente, Universidad de Vigo.

² Departamento de Explotación y Prospección de Minas, Universidad de Oviedo.

Resumen

Los incendios forestales suponen un problema a nivel económico, social y ambiental en las últimas décadas. Centrándose en la Reserva Transfronteriza de la Biosfera Geres-Xurés, dicha problemática está presente de manera muy activa, tanto en Portugal como en España.

Para conocer con mayor detalle el impacto de estos incendios en el área de estudio de la Reserva, en la parte española, se ha procedido al análisis de las imágenes Sentinel-2. Concretamente, se han detectado los incendios forestales en el período 2015-2020 a través de dichas imágenes. El resultado obtenido es comparado con capas de fuentes oficiales y el producto obtenido del satélite MODIS. Por último, mediante el uso de sistemas de información geográfica (SIG) se ha realizado un análisis espacial de la influencia factores, componentes del medio y elementos socioeconómicos

Para este período de 6 años, se detectaron más de 12.500 hectáreas quemadas, con 6 grandes incendios forestales (> 500 hectáreas), lo que supone un 35% de la superficie total del Parque Natural. La metodología aplicada permite perimetrar hasta un total de 57 incendios mediante el sensor Sentinel-2, frente a 14 de MODIS. Si se comparan los resultados obtenidos por ambos sensores, MODIS marca una diferencia de superficie de hasta el 30% con respecto al sensor Sentinel-2, con una clara tendencia a la sobreestimación. En cambio, los registros oficiales muestran mayor similitud a los resultados de Sentinel-2, especialmente en incendios menores de 200 hectáreas.

Las tecnologías satelitales son una herramienta útil para localizar zonas quemadas que, combinadas con los SIG, suponen un ahorro de recursos económicos y humanos en el análisis de los incendios forestales.

Palabras clave

GIF, Teledetección, Sentinel-2, MODIS, Sistemas de Información Geográfica, Reserva Transfronteriza de la Biosfera.

1. Introducción

A finales de siglo XX, la teledetección de áreas quemadas cobra especial importancia mediante los diferentes satélites existentes, incluidos en las misiones de Landsat o NOAA (MATSON et al., 1987). A medida que avanzan los años, son puestas en órbita misiones con tecnología más avanzadas, lo que mejora considerablemente aspectos técnicos como la resolución espacial y temporal de la imagen (BARKER et al., 1999), el margen de error y hace posible una comparación entre diferentes sistemas de detección (FULLER, 2000). Esto, sumado al potencial de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), facilitan la realización de una cartografía de las zonas afectadas y el posterior análisis estadístico (RECONDO et al., 2002).

Actualmente, tanto el programa Landsat como Copernicus son los más populares y empleados para la detección de zonas quemadas a través de imágenes de alta resolución. Esto se debe a que ambos programas ofrecen las imágenes de acceso libre. Además, cuentan con

numerosos satélites en constante renovación. Landsat, perteneciente a la agencia espacial estadounidense (NASA), tiene una larga trayectoria en la observación de la Tierra. Desde su primer lanzamiento, el Landsat 1 en 1972 hasta hoy en día con el Landsat 9 (septiembre del 2021). Por parte de la agencia espacial europea (ESA) se encuentra el programa Copernicus, de más reciente creación. Cuenta con las misiones Sentinel, que van desde el primer lanzamiento a mediados de 2014, hasta su último lanzamiento, el Sentinel-6 en noviembre de 2020. Sin embargo, no todos los sensores disponibles se utilizan para la observación de la superficie terrestre. Las misiones más recientes que se utilizan para esta tarea son Landsat 8 y Sentinel-2.

Para la detección de áreas quemadas se debe tener en cuenta la resolución espacial del sensor, que determinará el tamaño del píxel sobre la superficie, y la resolución temporal, dada por la frecuencia del satélite en una misma zona. Tanto en la misión europea como norteamericana, estas resoluciones son óptimas para estudios de severidad del incendio (MALLINIS et al., 2018). Otros sensores como MODIS, tienen una resolución temporal excelente, pero muy baja resolución espacial (JUSTICE et al. 2002).

Existen zonas a lo largo del planeta donde históricamente ocurren los incendios forestales (SCHULTZ et al. 2008). En estos lugares, los ecosistemas ya están adaptados (PAUSAS & KEELEY 2019) y evolucionan junto con estos fenómenos naturales. En los últimos años se está viendo una tendencia a incendios en zonas donde antes no ocurrían (SHKOL'NIK et al. 2008) o con mayor severidad (DI VIRGILIO et al. 2019). Esto puede repercutir en diferentes problemas de salud para la población expuesta a la contaminación que se genera (SANDOVAL et al. 2021) (CANCELO-GONZÁLEZ & DÍAZ-FIERROS 2018). En la región mediterránea, donde un gran porcentaje de la superficie del territorio es forestal, y la interacción del ser humano con el fuego es mayor, los incendios también se vienen dando históricamente (VÉLEZ, 2004) . Destacan España y Portugal por encima de otros países del sur y centro de Europa (MARTÍN et al., 1994).

Con el análisis de las imágenes que los diferentes satélites ofrecen, a través de la radiación reflejada por la superficie, se pueden observar las diferencias de las firmas espectrales entre vegetación quemada y no quemada. Esto se debe a una menor capacidad fotosintética de la vegetación quemada, a un deterioro de su estructura (sobre todo de las hojas) y a un aumento de la sequedad, lo que se traduce en una baja reflectividad en el visible (VIS) y el infrarrojo próximo (Near Infrared, NIR) y a un aumento de la reflectividad en el infrarrojo medio de onda corta (Short Wavelength Infrared, SWIR). El índice relativizado de área quemada (PARKS et al., 2014) (RBR) se ha mostrado fiable para estos objetivos en el caso de imágenes Landsat y con valores muy similares o mejores para Sentinel-2 (QUINTANO et al., 2018) (GARCÍA-LLAMAS et al. 2019) . El RBR se calcula a partir de los índices Normalized Burn Ratio (NBR) y delta Normalized Burn Ratio (dNBR) (KEY & BENSON, 2005).

La provincia de Ourense, donde según el Tercer Inventario Forestal Nacional el 80% de su superficie es forestal, es uno de los territorios donde cada verano se suceden los incendios forestales (MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE DE ESPAÑA, 2002) coincidiendo con las condiciones meteorológicas más propicias para los incendios, no solo de Galicia (DE CASTRO, 2011), si no del país (JIMÉNEZ et al. 2005). Por otro lado, en el último Anuario de Estadística Forestal, que comprende los años de 2006 a 2015, se determinó que cerca del 15% de la superficie quemada se encontraba en algún área protegida. En estas zonas, el fuego es si cabe más preocupante, puesto que destruye ecosistemas con gran valor natural (MORENO, 2011). Entre estos ecosistemas protegidos se encuentra la Reserva Transfronteriza de la Biosfera Geres-Xurés, que también incluye, en su parte española, las protecciones correspondientes a Zona de Especial Protección de Aves (ZEPA), Zona de Especial Conservación (ZEC) y Lugar de Importancia Comunitario (LIC).

Este enclave al suroeste de Ourense y limítrofe con Portugal es, históricamente, una de las zonas con mayor concentración de incendios de toda España, como así lo muestran los informes realizados por el Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, en los documentos analíticos del decenio 1991-2000 (España 2002) y para años anteriores. Dicho espacio es Parque Natural desde el año 1993 y Reserva de la Biosfera desde 2009, corresponde con el Parque de mayor extensión de Galicia. Contiene fuertes pendientes y las sierras de Laboreiro (Oeste), Xurés (centro) y Pena (Este), de altitudes entre 1.300 y 1.500 m, formadas por grandes roquedos graníticos que conforman un paisaje singular y muy característico. Hacia el interior de la provincia, a medida que descienden las pendientes y altitudes, también se concentra la mayor densidad de población en torno al valle del río Limia y a los embalses de Lindoso, As Conchas y Salas.

2. Objetivos

Los principales objetivos de este trabajo son:

- Cartografiar y analizar los incendios forestales en el período 2015-2020 a partir de las imágenes Sentinel-2
- Comparar esta cartografía con los registros oficiales y la cartografía MODIS de área quemada.
- Determinar las zonas, el uso del suelo y las especies forestales más afectadas por los incendios

3. Metodología

Para el análisis espacial de los incendios en la zona de estudio, se utilizaron tres fuentes distintas de información. Dos de las fuentes de los distintos satélites Sentinel-2 y MODIS. La tercera, a partir de datos oficiales recogidos por los funcionarios públicos de la Xunta de Galicia. De esta manera, se puede comparar los años en los que la fuente es común.

3.1 Sentinel-2

Se seleccionaron las imágenes Sentinel-2 pertenecientes al período de mayor incidencia de los incendios forestales, entre los meses de mayo y octubre de 2015 al 2020. Estas imágenes han sido corregidas topográfica y atmosféricamente a través del programa SNAP 8.0 de la Agencia Espacial Europea (ESA) utilizando el plugin Sen2cor (LOUIS et al. 2016). Mediante los índices empleados de NBR y RBR se puede determinar el área de las zonas quemadas. Estos son empleados en el mismo programa, tal y como se indica en la Tabla 1.

Tabla 1. Índices espectrales utilizados, fórmulas y aplicación a las bandas de Sentinel-2.

ÍNDICE	ACRÓNIMO	FÓRMULA	APLICACIÓN SENTINEL-2
Normalized Burn Ratio	NBR	$\frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR}$	$b8(8A) - b12$ $b8(8A) + b12$
delta Normalized Burn Ratio	dNBR	NBR _{pre} incendio - NBR _{post} incendio	NBR _{pre} - NBR _{post}
Relativized Burn Ratio	RBR	$\frac{dNBR}{NBR_{pre} + 1,001}$	$dNBR$ $NBR_{pre} + 1,001$

A través del índice relativo de área quemada (*Relativized Burn Ratio*, RBR) se calculó la superficie ardida y se cartografiaron los incendios. Posteriormente, el RBR obtenido se filtró mediante operaciones en los índices para eliminar el agua, utilizando el índice NDWI2 (McFEETERS 1996) y las nubes, mediante máscaras (KOVÁCS 2016), que en las imágenes se muestra con valores similares a las zonas quemadas. Se le aplica al resultado final un umbral genérico usado por el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) de moderada baja severidad de 0.27, con el fin de determinar exactamente las zonas quemadas (PARKS et al., 2014), descartando posibles errores.

La capa final obtenida es exportada en QGis v3.10. El Sistema de Referencia de Coordenadas (SRC) utilizado es el ETRS89/UTM zona 29N (EPSG:25829). Nos servimos de apoyo mediante ortofotos para ligeros errores en cuanto a las superficies quemadas. Concretamente, algunas de las zonas detectadas inicialmente pertenecen a parcelas agrícolas (**Figura 1**). Por lo tanto, se realiza una revisión de cada zona detectada con el fin de eliminar posibles errores en la detección.

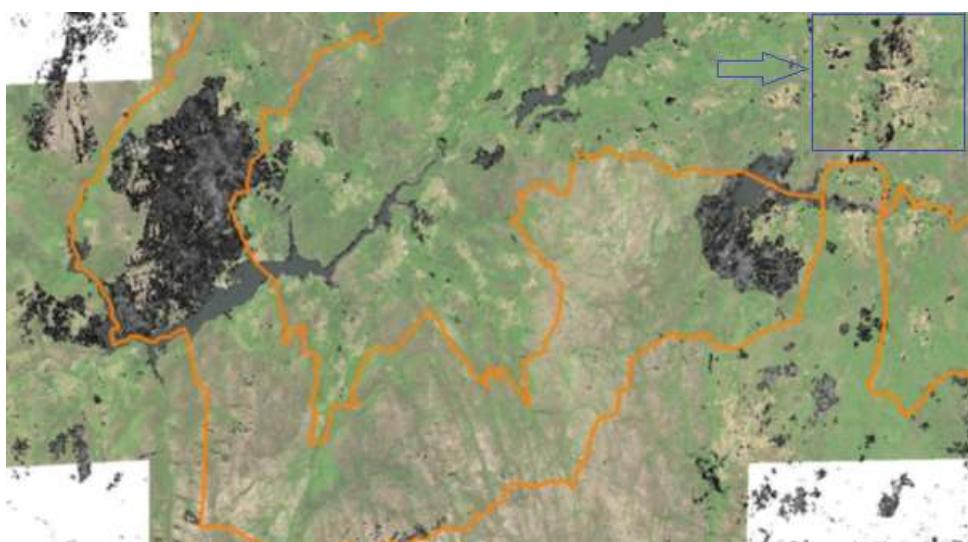


Figura 1 Detalle de la imagen RBR de incendios del año 2016 del sur del Parque Natural do Xurés, superpuesta a la ortofoto PNOA. Zona agrícola en la esquina superior derecha que es interpretada como zonas quemadas.

Además de las ortofotos, las distintas combinaciones de bandas forman imágenes que resaltan el perímetro de las zonas afectadas, como por ejemplo en falso color. De este modo se obtendrá la detección y cartografía anual (2015-2020) de los incendios forestales en la zona objeto de estudio (**Figura 2**).

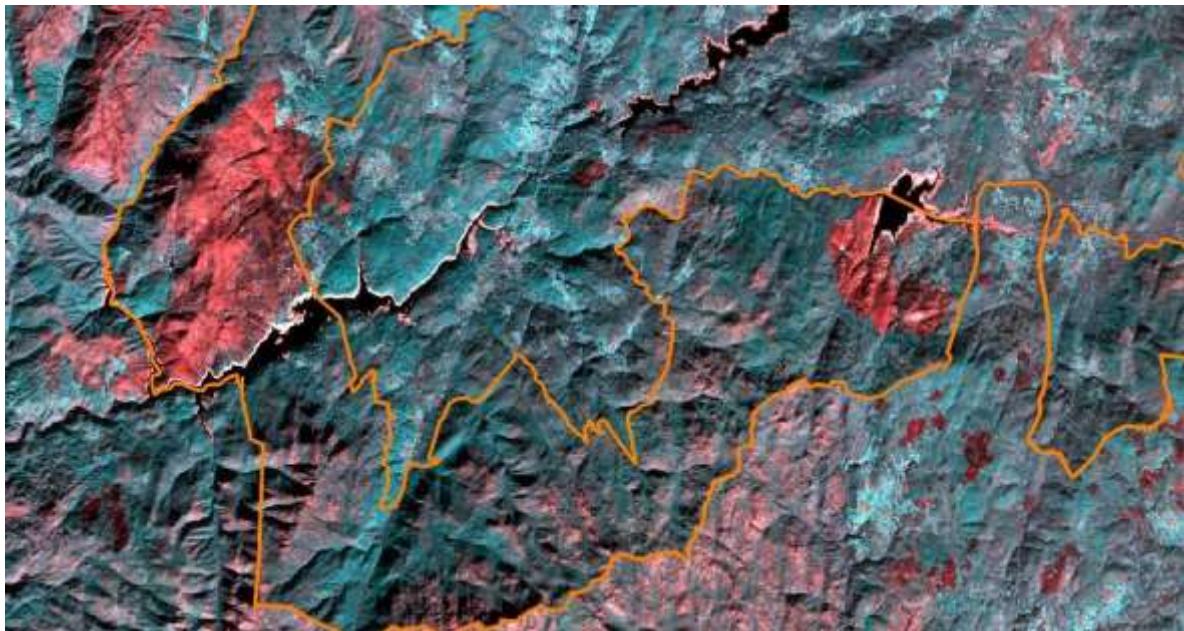


Figura 2. Detalle de la imagen 12-8A-7 de incendios detectados en el sur del Parque Natural do Xurés. Año 2016.

3.2 MODIS

Desde el servidor de la Universidad de Maryland se descarga la información relativa a las áreas quemadas de la zona de estudio. Este producto es elaborado por la NASA e incluye la información agrupada por meses desde el año 2000. Está accesible para todas las regiones del mundo, en este caso la seleccionada será Europa. Para este estudio se descargan las capas en formato shape de los meses de mayo a octubre desde el año 2015 a 2020. Este período es el mismo que el utilizado para las imágenes Sentinel-2. Una vez obtenida la información en formato shape, se agrupa para cada año y se recorta el área de estudio siguiendo el procedimiento de (GIGLIO et al. 2016).

3.3 Registros oficiales

Se dispone de una base de datos sobre los incendios forestales de la zona con información relativa a las coordenadas del punto de origen del incendio, fecha y superficie afectada por el mismo. Dicha base de datos fue cedida por la fundación Civio.es donde el registro ha sido realizado por los funcionarios públicos de la Xunta de Galicia. Tiene un período que va desde el año 2001 hasta 2015, año en que coincide con el análisis de Sentinel-2. Estos datos pueden ser representados como puntos ya que se desconoce la localización real afectada. Por lo tanto, se han cartografiado como puntos, en función del tamaño de cada incendio (Figura 3):

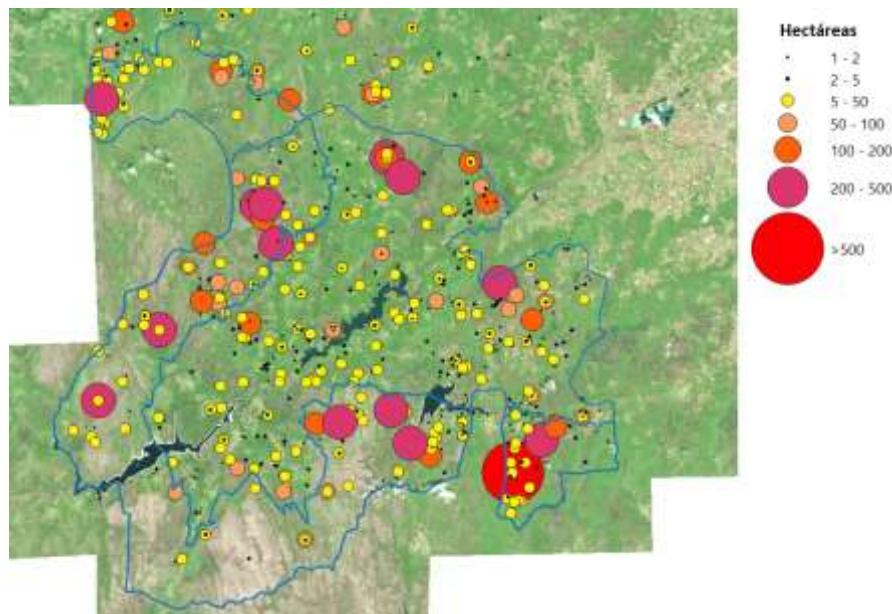


Figura 3. Mapa de incendios >1 hectáreas en el área de estudio en el período 2001-2015 a partir de los registros oficiales. Fuente: Elaboración propia a partir de la base de datos Civio.es

3.4 Tratamiento de datos

El cálculo de medias para las distintas bases de datos de incendios forestales, así como medianas, percentiles y la regresión lineal a partir de la comparación entre distintas fuentes, se realiza mediante el programa R (v. 4.1.1). Para la obtención de las superficies de los incendios forestales cartografiados, se emplean las herramientas nativas de QGis v3.10.

3.5 Usos del suelo, propiedad y especies forestales afectadas

Mediante el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE), se determina el uso de suelo afectado por los incendios forestales. La versión utilizada para este trabajo es la disponible actualmente para Galicia, que data del año 2014. Para las especies forestales afectadas, el Mapa Forestal de España (MFE) es la base cartográfica que se utiliza. En este caso, la fecha disponible data de 2011. Se ha escogido la especie de mayor ocupación e importancia presente en cada tesela del mapa.

Finalmente, para determinar la titularidad de las zonas quemadas recurrimos al inventario Español del Patrimonio Natural y de la Biodiversidad (IEPNB) “Inventario Español de Patrimonios Forestales. Catálogo de Montes de Utilidad Pública”. Con esta capa se puede precisar cuáles han sido los montes afectados y en qué medida.

4. Resultados

4.1 Estadísticas a partir de los registros oficiales

En el período 2001-2015, a partir de datos oficiales se producen un total de 1.491 incendios forestales entre 1 y 564 hectáreas de tamaño. La mediana resultante del total es de 2,5 hectáreas. Este es el valor más representativo de la muestra, puesto que más del 70% de los incendios tienen una superficie inferior a las 5 hectáreas.

Si se observa el número de incendios, la tendencia es decreciente de una manera muy acentuada, desde el año 2001 con casi 300 incendios hasta los 35 de 2015. En cuanto a la frecuencia de incendios, parece mantenerse un patrón de 4-6 años para que se dé un período con un alto número de incendios, sucediendo esto para 2001 (276), 2005 (201) y 2011 (144). Sin embargo, la superficie afectada no muestra una tendencia decreciente. Existen años en los que la superficie afectada muestra valores muy altos respecto a otros.

Por municipios pertenecientes a la Reserva de la Biosfera y al LIC, los más afectados en cuanto al número de incendios son Muiños (359) y Calvos de Randín (262), frente a los 29 de Quintela de Leirado, que marcan con mucha diferencia el mínimo. En cuanto a la superficie afectada en el período 2001-2015, los resultados son similares entre ellos. Específicamente, Muiños y Calvos de Randín alcanzaron los valores más altos, con cerca de 3.000 hectáreas quemadas en este período de 15 años (**Figura 4**). Esto coincide con los municipios con mayor número de incendios. El municipio de Lobeira sobrepasó las 2.000 hectáreas, siendo el tercer municipio con mayor superficie quemada de toda la zona de estudio.



Figura 4. N° de incendios y superficie afectada por municipios período 2001-2015.

4.2 Cartografía de áreas quemadas a partir de Sentinel-2

Se cartografiaron un total de 57 zonas quemadas entre el año 2015 y el 2020, que van desde 1 hectáreas hasta 3.266 hectáreas, con un total de 12.500 hectáreas afectadas. La mayoría de estas zonas se encuentran dentro de la figura de protección del Parque Natural, en la zona limítrofe con Portugal (**Figura 5**).

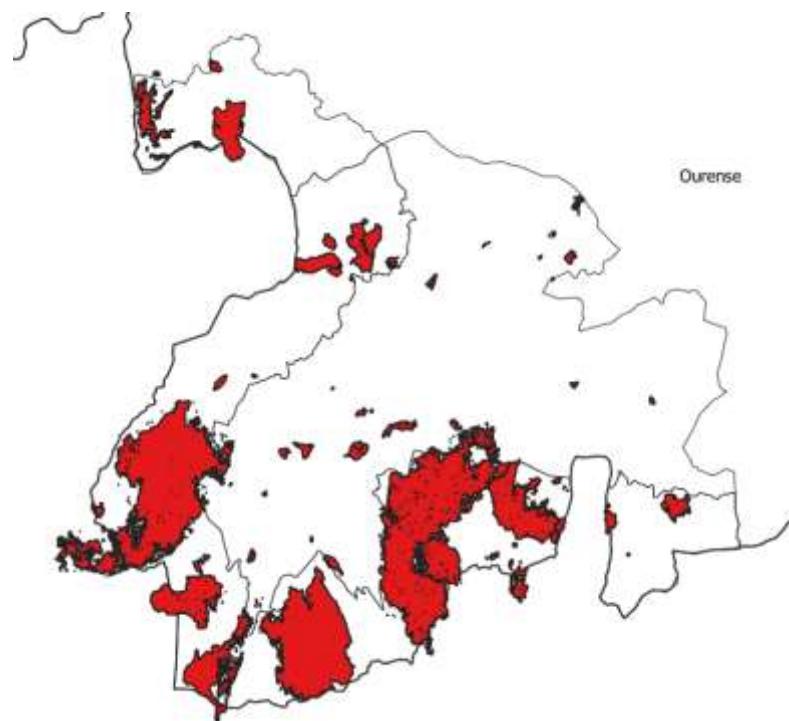


Figura 5. Cartografía de zonas quemadas (rojo) entre 2015-2020 a partir de imágenes Sentinel-2.

En un análisis temporal (**Figura 6**), se puede comprobar como en los años 2016, 2017 y 2020 se han producido los mayores siniestros, con incendios superiores a las 500 hectáreas, siendo estos el grueso de la superficie total afectada en la zona de estudio para todo el intervalo temporal.

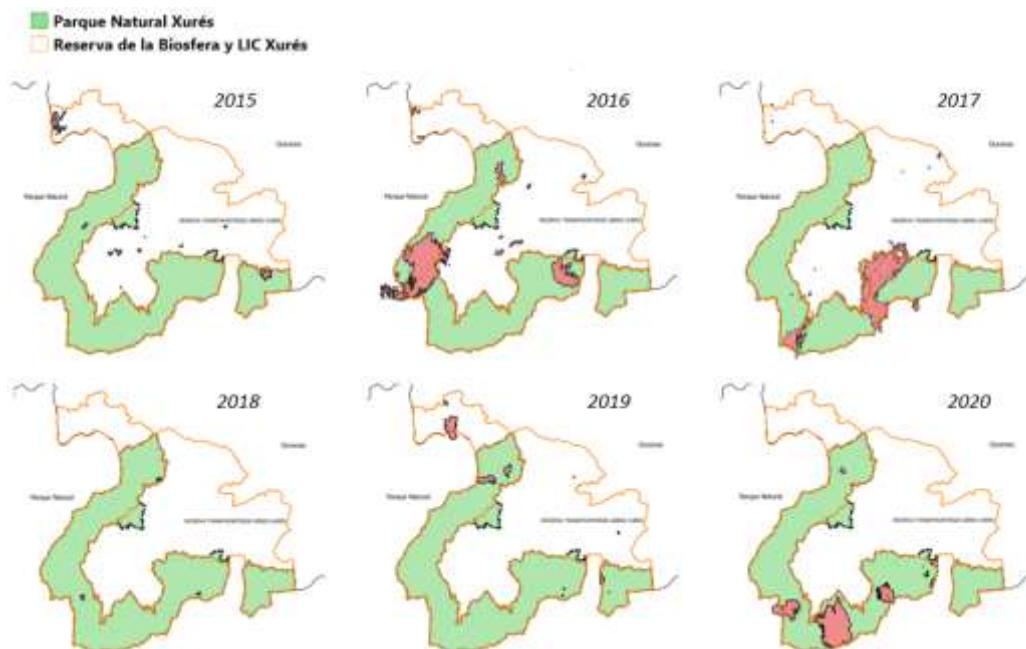


Figura 6. Serie anual de áreas quemadas (rojo) por incendios forestales en Xurés a partir de las imágenes Sentinel-2.

En este período 2015-2020, el total de los incendios cartografiados con Sentinel-2 tienen una mediana de 19 hectáreas. De igual manera que para el anterior período, la media no es representativa de la muestra, por ello se escoge la mediana. Más del 50% de las áreas quemadas cartografiadas no superan las 20 hectáreas. En cuanto al número de incendios, varían entre los 4 y 14 incendios anuales.

La superficie afectada anual en este período de 6 años es muy variable, con años como 2016, 2017 y 2020 donde se superan las 3.000 hectáreas. El resto de años presentan valores muy bajos, especialmente 2018. Estos valores de superficie, si se comparan con el período anterior de 2001-2015, se aprecia la magnitud del problema actual (**Figura 7**).

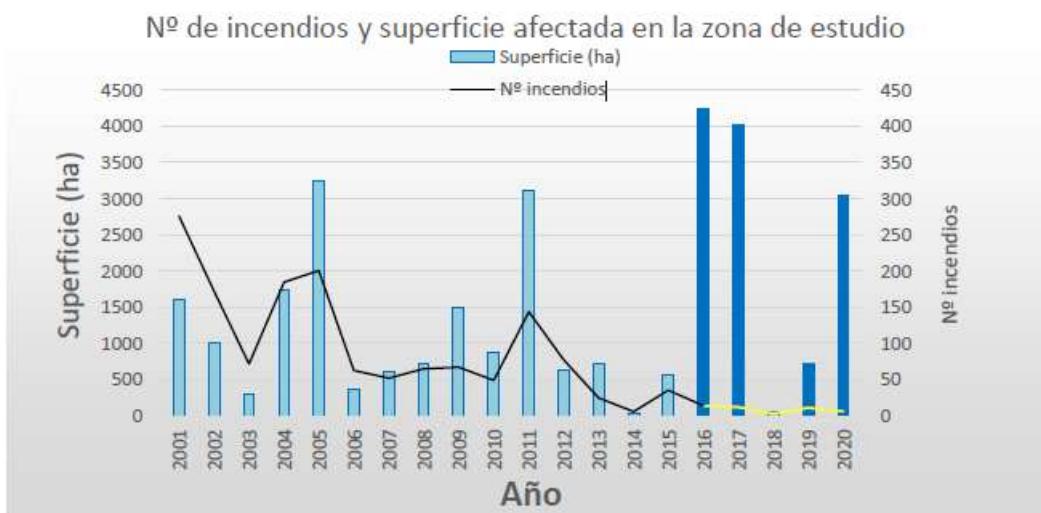


Figura 7. N° incendios (amarillo período Sentinel-2, negro registros oficiales) y superficie afectada (azul oscuro período Sentinel-2, azul claro registros oficiales) anual.

4.3 Comparativa entre diferentes sistemas de medición

A partir de la cartografía obtenida con las imágenes del satélite Sentinel-2, se puede comparar con otros sistemas ya señalados, como la cartografía MODIS y los registros oficiales, derivados de mediciones en campo y otras técnicas.

4.3.1 Sentinel-2 versus MODIS

Partiendo de la base de que la cartografía MODIS cuenta con una resolución mucho más baja que la de Sentinel-2 (500 m frente a 20 m, respectivamente), se puede esperar de esta comparación entre ambas cartografías una diferencia en cuanto a la superficie medida. Esta diferencia de resolución es apreciable en el resultado obtenido para cada área quemada (**Figura 8**).

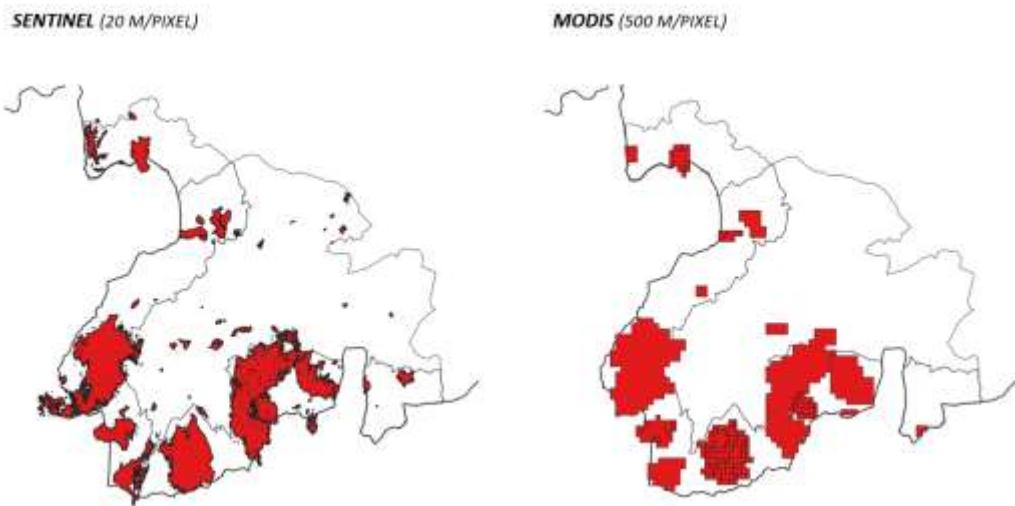


Figura 8. Comparativa entre la cartografía de áreas quemadas (rojo) de Sentinel-2 y MODIS, período 2015-2020.

Del total de las áreas quemadas cartografiados vía Sentinel-2, 13 han sido captadas también por MODIS para el período de estudio de 6 años, todas ellos mayores de 50 hectáreas (**Tabla 2**).

Tabla 2. Hectáreas para cada área quemada obtenida en común con MODIS y Sentinel-2. (El nombre de cada incendio hace referencia al municipio y parroquia de origen, siempre y cuando esta haya sido determinada).

AÑO	MODIS (ha)	SENTINEL (ha)	NOMBRE
2015	106,5	184,44	if_Padrenda
2016	106,95	55,84	IF_CadosMuíños
	284,02	183,52	IF_ParadaLobeira
	871,6	766,48	IF_RequiasMuíños
	3355,35	2770,64	IF_EstrimoLobios
	124,58	90,04	IF_RequiasMuíños
2017	427,38	599,87	IF_RioCaldoLobios
	2704,10	3233,84	IF_LobiosPortugal
	177,55	159,26	IF_SanXesVilarinhoLobeira
2019	407,95	356	IF_SanPedrodaTorrePadreda
	444,84	398	IF_PradeLimiaMuíños
	694	576	IF_ManinLobios
2020	2029,59	1956	IF_RioCaldoLobios
	TOTAL =>	11.734,2	
		11.329,93	

En total son 10 incendios en los que MODIS sobreestima más superficie, de media 27,6%, y 3 incendios que MODIS mide de media un 28,6% menos de superficie que Sentinel-2. Estas diferencias son notables independientemente de la superficie del incendio, aunque se parte de unas superficies mínimas superiores a 100 hectáreas en su mayoría.

El análisis de regresión lineal entre la superficie obtenida con ambas cartografías (**Figura 9**) da como resultado una ecuación en la que se muestra que, por cada hectárea que mide MODIS, Sentinel-2 mide 0,985 hectáreas ($R^2= 0,9507$). Por lo tanto, existe una alta correlación entre la superficie medida por ambas cartografías.

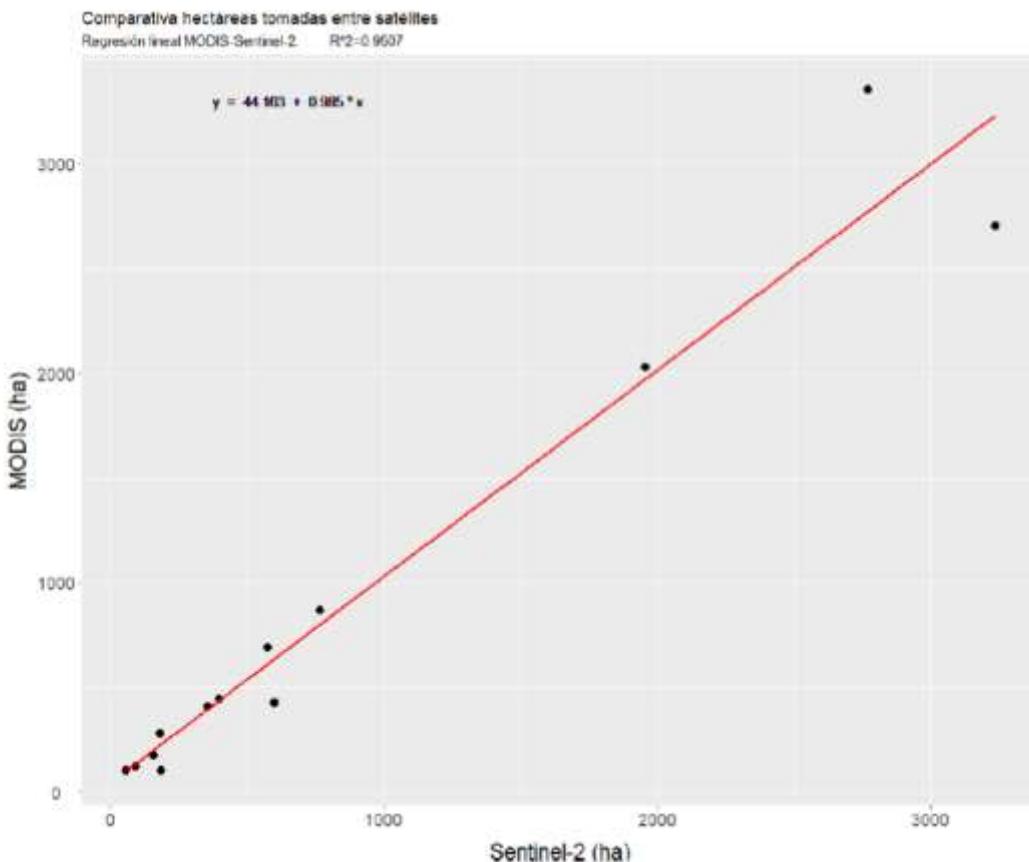


Figura 9. Gráfica de comparativas hectáreas tomadas por los diferentes satélites.

A partir de las quemas cartografiadas mediante elaboración propia con Sentinel-2, se puede obtener también el número (y su superficie) de aquellas no cartografiadas por MODIS. MODIS no cartografió 43 quemas de las 57 totales cartografiadas por Sentinel-2. Estas tienen una superficie media de 12 hectáreas, siendo la mayor de 124,16 hectáreas.

Dos incendios registrados a través de MODIS no fueron detectados a través de la metodología propia a partir de Sentinel-2. Dichos incendios tienen una superficie de 18,6 y 17 hectáreas, ambos en el año 2017. En el primero de los casos, no ha sido captado por el período seleccionado para la imagen Sentinel-2 post-incendio (22 de octubre) de ese año, mientras que el otro de 17 hectáreas sucede en la frontera, pero que el sensor MODIS sitúa parte de este en la zona gallega, siendo en la práctica totalidad en zona portuguesa.

4.3.2 Sentinel-2 versus Registros oficiales

El año 2015 es el único común entre la cartografía Sentinel-2 y los registros oficiales de incendios, por lo que la comparativa entre los incendios detectados solamente se hará con estos datos. Atendiendo a los datos, la fuente tomada en campo va a ser aquella que menos errores de omisión tendrá, de ahí el elevado número de incendios de baja superficie.

Para el año 2015, de un total de 35 incendios registrados oficialmente, de los cuales 10 han sido detectados por Sentinel-2. La superficie obtenida para estos últimos con ambas fuentes está comprendida entre 1 y 200 hectáreas (**Tabla 3**).

Tabla 3. Hectáreas para cada área quemada obtenida en común con los registros oficiales de incendios y Sentinel-2

AÑO	OFICIAL	SENTINEL	NOMBRE
2015	1,5	1,3	IF_RequiasMuinhos
	2,7	2,28	IF_StaCruzGrouLobeira
	3,21	2,72	IF_ArauxoLobios
	12,4	5,4	IF_PradoLimiaMuinhos
	10,18	15,77	if_ParadaVentosaMuinhos_
	19,2	18,25	if_GalezEntrimo_
	21	25,26	if_APereiraEntrimo_
	35,63	36,12	if_GrouLobios_
	128,13	124,16	if_RubiasCalvosdeRandin_
	216,57	184,44	if_Padrenda_

En este caso, los incendios cartografiados representan superficies menores a 200 hectáreas. Destacan diferencias de menos de 5 hectáreas para todos los incendios salvo el mayor que ronda las 200 hectáreas, con una diferencia de 32 hectáreas entre un método y otro. Existe una gran relación entre unas medidas y otras (R^2 de 0,9921; **Figura 10**).

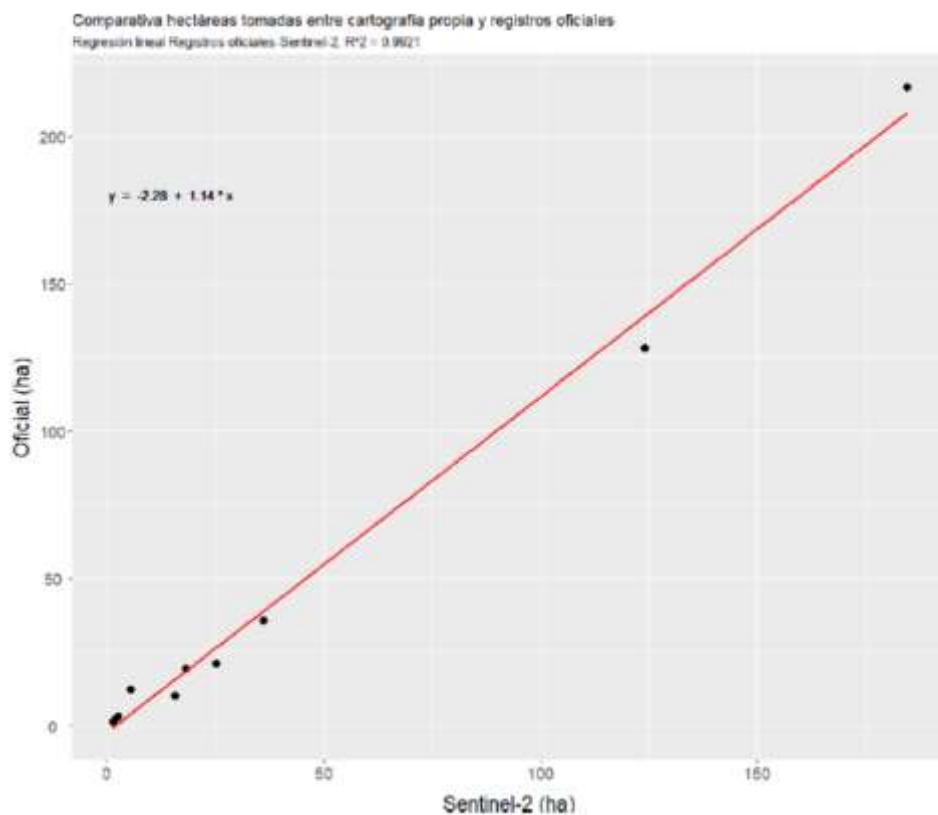


Figura 10. Comparativa de superficie quemada según los datos oficiales y la superficie detectada por Sentinel-2.

De igual manera que para la comparación anterior, se pueden analizar aquellos incendios forestales que no fueron detectados en la cartografía propia Sentinel-2 (errores de omisión en esta cartografía), y así determinar el grado de confiabilidad de esta cartografía. Para el año 2015, de los 35 incendios registrados, 25 no han sido cartografiados por Sentinel-2, en su mayoría menores de 2 hectáreas (media 2,24 hectáreas) y con 3 de ellos por encima de las 10 hectáreas (máximo 17,55 hectáreas).

4.3.3 MODIS versus Registros oficiales

Finalmente, la comparación en el año 2015 entre la cartografía con menor resolución (MODIS) y los registros oficiales, que han registrado incendios con tamaños inferiores a 5 hectáreas, es esperable una gran diferencia en el resultado. Tan solo 1 incendio (el mayor del año 2015) de 216 hectáreas ha sido cartografiado por MODIS, dando este como resultado una superficie de 106,5 hectáreas. Cabe destacar los incendios de 128 y 35 hectáreas que MODIS no registra, siendo ya los restantes menores de 20 hectáreas, donde MODIS no los detecta.

4.4 Impactos de los incendios forestales

A partir de la cartografía del período 2015-20, se extraen los siguientes resultados. En referencia a las protecciones ambientales y divisiones administrativas de la zona:

- La superficie total del Parque Natural do Xurés, que es de 293,45 km², se quemó en un total de 101,60 km². Esto supone el 34,62 % de la superficie total del Parque.
- La superficie total de la Reserva de la Biosfera Transfronteriza Geres-Xurés, en suelo gallego es de 627,78 km². De esta, se han quemado 111,15 km² (la gran mayoría en la zona del Parque Natural). Esto supone un 17,71% de la superficie de la Reserva.
- En un total de 7 parroquias arde más del 45 % de su superficie, llegando a valores máximos como A Cela (Lobios) con 73% de superficie arrasada, o Xermeade (Muiños) con el 66%.

El uso del suelo cuya superficie más afectada por dichos incendios es de matorral y de aquellas zonas de mayoría roquedo, que en conjunto suponen cerca del 70 % de la superficie afectada (**Tabla 4**). Estos resultados están en concordancia con los usos del suelo predominantes en la zona.

Tabla 4. Usos del suelo afectados por los incendios forestales período 2015-2020.

Uso del suelo	Superficie (hectáreas)
Temporalmente desarbolado por incendio	0,09
Asentamiento agrícola y huerta	0,81
Servicio dotacional	0,82
Red viaria o ferroviaria	1,07
Prado	16,26
Cultivo herbáceo	22,63
Agua	40,5
Pastizal o herbazal	83,55
Suelo desnudo	94,55

Bosque mixto	310
Combinación cultivos con vegetación	343,79
Bosque frondosas	369,08
Combinación de vegetación	688,38
Bosque coníferas	1378,33
Roquedo	3734,68
Matorral	4618,17

La superficie afectada entre 2015 y 2020 en la que se encuentran especies forestales, llegan a un total de 2.196 hectáreas según el Mapa Forestal de España. Las principales especies existentes en la superficie quemada se corresponde con *Pinus pinaster* (75%), *Quercus pirenaica* (15,5%) y *Pinus sylvestris* (6,6%). Estos están localizados en su mayoría en los municipios de Entrrimo y Lobios, en los grandes incendios forestales de 2016 y 2020.

En lo referido a la titularidad de las superficies afectadas, la mayoría de la superficie de la zona de estudio pertenece a montes vecinales en mano común (MVMC). Se ha determinado que, del total de las 12.500 hectáreas quemadas cartografiadas, 9.874 ha corresponden a esta figura de titularidad privada, prácticamente el 80%. Aproximadamente 200 hectáreas se han visto afectadas en Montes Públicos de Entidades Locales, en el municipio de Entrrimo, parroquia del mismo nombre. Cabe señalar que para toda la zona de estudio solamente existen cerca de 800 hectáreas de este tipo de montes públicos.

5. Discusión

Para este trabajo se han seleccionado las imágenes en un período donde se producen la mayoría de los incendios, es decir, durante los meses de julio a octubre, cuando se registran la mayor parte de los mismos. Esto ha facilitado la detección de estos tanto por MODIS como por Sentinel-2. De modo que, ante la comparación de ambos sensores, se obtiene una correlación alta ($R^2 = 0.9507$), sobre todo para incendios de más de 100 hectáreas. En otros estudios con un mayor número de incendios, muestran una tendencia a equipararse las medidas de los sensores al incrementar la superficie de los incendios (ROTETA et al. 2019).

La resolución espacial de las imágenes empleadas por Sentinel-2, de 20 metros, parece suficiente para llegar a cartografiar incendios de hasta 1 hectárea. No así MODIS, que suele mostrarse más débil por debajo de las 20 hectáreas (HANTSON et al. 2013), y trabaja con una resolución espacial de 500 metros. Se ha observado incluso algún incendio de más de 100 hectáreas que queda sin registrar por este satélite de la NASA, aunque cabe decir que es algo muy particular. Estos errores de omisión se deben principalmente a la baja resolución del satélite (GIGLIO et al. 2009). También puede deberse a la zona en la que se dan los siniestros. Al tratarse de una zona de gran nubosidad a lo largo del año, aquellos incendios pequeños, que son la mayoría, no siempre son detectados. Estas limitaciones hacen que el resultado de comparar los incendios detectados por MODIS y por los registros oficiales sea tan dispar, como se ha visto también en otras ocasiones donde la zona de estudio abarcaba toda la comunidad gallega (REGOS, 2018).

En cambio, con los registros oficiales no se tiene el problema para detección y notificación de superficies pequeñas. Es por ello que es necesario conocer la metodología que siguen los encargados de la medición de superficies. Cuando la superficie del incendio es muy grande (GIF), los recursos (económicos, materiales, humanos y de tiempo) necesarios para la medición en campo de la superficie total ardida serían mucho más elevados que con las tecnologías espaciales, aumentando la probabilidad del error. Puesto que la comparación aquí realizada ha

sido en el año 2015, ningún incendio superaba las 200 hectáreas, no teniendo entonces una comparación para superficies grandes.

De los períodos de mayor actividad incendiaria se ha visto cómo varía cada 4-6 años. Esto puede deberse principalmente a la regeneración de vegetación transcurrido dicho periodo de tiempo. Así, se regeneran los brotes tiernos y nuevos para el pasto (VARILLAS, 2006). Consecuentemente la disponibilidad de grandes superficies regeneradas puede aumentar. El número de incendios entre el periodo 2015-2020 no resulta tan fiable en comparación a los ofrecidos oficialmente por registros oficiales. Esto se debe a la metodología, que detecta principalmente aquellos incendios superiores a 20 hectáreas. Pese a esto, el problema de los incendios va en aumento, puesto que la superficie afectada no se ve reducida con el tiempo. Una vez se tiene el ráster generado a partir del RBR para la localización de los incendios, el proceso de vectorización realizado en Qgis ignora aquellas “islas” o zonas sin quemar de tamaño reducido dentro del perímetro de los mayores incendios. Esto puede modificar los valores mínimamente para la superficie total.

Una de las mayores dificultades a la hora de trabajar con datos relativos a incendios forestales es la ausencia de información oficial. En este caso, los registros oficiales de los que se dispone cuentan con el punto de origen, pero se han encontrado errores como una geolocalización incorrecta, por lo tanto, se descartan o solo se incluye en el análisis el dato de superficie afectada. Otro aspecto que se considera relevante para facilitar la investigación en este campo es la creación y disponibilidad de una cartografía oficial, además de conocer la metodología que se sigue de manera oficial para la obtención final de la superficie.

6. Conclusiones

A partir de las imágenes del satélite Sentinel-2 y de las técnicas de teledetección utilizadas, se han podido detectar las zonas quemadas en el período de 2015 a 2020 en la zona de estudio. Los resultados de esta metodología son comparados con MODIS y fuentes oficiales. De las 3 fuentes analizadas, Sentinel-2 es la que obtiene un mayor acierto en cuanto a número y superficie de incendios. El sensor MODIS ofrece un producto disponible de áreas quemadas con menor resolución de las obtenidas a través de Sentinel-2, mientras que de los registros oficiales solamente se disponía del punto de inicio del incendio y valor de superficie afectada, todo ello en datos previos al año 2015.

En la comparación entre sensores de teledetección de diferentes resoluciones, se ha constatado la diferencia en cuanto al número de áreas quemadas detectadas, con 57 por parte de Sentinel-2 frente a las 14 de MODIS. Hasta en 10 de estos incendios detectados por ambos, la superficie resultante de MODIS fue superior, y en 3 incendios un 30% inferior de media. Esta diferencia se ha determinado independientemente del tamaño del incendio. Sentinel-2 se muestra muy fiable para las quemas de menos de 200 hectáreas en comparación con el dato que aporta la administración.

Se ha visto la importancia de estos incendios en la zona desde 2001, con un total de casi 30.000 hectáreas quemadas en 20 años, concluyendo que el número de incendios va en descenso. Frente a este descenso, las superficies afectadas se mantienen en valores muy altos para años concretos, dando lugar a un mayor número de Grandes Incendios Forestales.

Finalmente cabe destacar que, con casi el 35% de la superficie del Parque Natural Baixa Limia- Serra do Xurés afectado en tan solo 6 años, se estima necesario tomar medidas que disminuyan estos grandes incendios forestales. Cada verano, dichos eventos generan un gran impacto en una zona de alto valor ecológico, poniendo en peligro numerosos pueblos y

quemando en su mayoría zonas de matorral, de titularidad privada (MVMC) y que dificultan el desarrollo económico de la zona.

7. Agradecimientos

Project 4Map4Health, selected in the call ERA-Net CHIST-ERA IV (2019), and founded by the State Research Agency of Spain (reference PCI2020-120705-2/AEI/10.13039/501100011033).

8. Bibliografía

BARKER, J.; DOLAN, S.; SABELHAUS, P.; WILLIAMS, D.; IRONS, J.; MARKHAM, B.; BOLEK, J.; SCOTT, S.; THOMPSON, R.; RAPP, J.; ARVIDSON, T.; KANE, J.; STOREY, J. 1999. Landsat-7 Mission and Early Results. Sensors, Systems, and Next-Generation Satellites III. Vol. 3870, pp. 299–311.

CANCELO, J.; DÍAZ-FIERROS, V. 2018. Incendios forestales y salud pública. Anales de la Real Academia Nacional de Farmacia. 84: 289–300.

DECASTRO, P.; DECASTRO, M.; GOMEZ-GESTEIRA, M. 2011. Identificación de olas de calor en galicia en el periodo 1987-2006: efectos sobre la mortalidad. Avances en ciencias. 52–64.

MINISTERIO DE MEDIO AMBIENTE DE ESPAÑA. 2002. Los incendios forestales en españa. Decenio 1991-2000

FULLER, D. O. 2000. Satellite remote sensing of biomass burning with optical and thermal sensors. Progress in physical geography 24(4): 543–61.

GARCÍA-LLAMAS, P.; SUÁREZ-SEOANE, S.; FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M.; FERNÁNDEZ-GARCÍA, V.; FERNÁNDEZ-MANSO, A.; QUINTANO, C.; TABOADA, A.; MARCOS, E.; CALVO, L. 2019. Evaluation and comparison of Landsat 8, Sentinel-2 and Deimos-1. Remote Sensing Indices For Assessing Burn Severity In Mediterranean Fire-Prone Ecosystems. International Journal Of Applied Earth Observation And Geoinformation. Vol. 80, 137-144.

GIGLIO, L.; LOBODA, T.; ROY, D. P.; QUAYLE, B.; JUSTICE, C. O. 2009. An active-fire based burned area mapping algorithm for the MODIS sensor. Remote sensing of environment, 113(2), 408-420.

GIGLIO, L.; BOSCHETTI, L.; ROY, D.; HOFFMANN, A.; HUMBER, M.; HALL, J. V. 2016. Collection 6 MODIS burned area product user's guide version 1.0. Nasa EOSDIS Land Processes DAAC: Sioux Falls, SD, USA.

HANTSON, S.; PADILLA, M.; CORTI, D.; CHUVIECO, E.. 2013. Strengths and weaknesses of modis hotspots to characterize global fire occurrence. Remote sensing of environment 131: 152–59.

DÍAZ, J.; LINARES, C.; GARCÍA, R. 2005. Impacto de las temperaturas extremas en la salud pública: futuras actuaciones. Revista española de salud pública, 79, 145–157.

JUSTICE, C.; GIGLIO, L.; KORONTZI S.; OWENS, J.; MORISSETTE, J.; ROY, D.; DESCLOITRES, J.; ALLEAUME, S.; PETITCOLIN, F.; KAUFMAN, Y. 2002. The MODIS fire products. *Remote Sensing of Environment* 83(1–2): 244–62.

KEY, C. H.; BENSON, N.C. 2005. The Normalized Burn Ratio (NBR): A Landsat TM radiometric measure of burn severity. United States Geological Survey, Northern Rocky Mountain Science Center: Bozeman, MT, USA

KOVÁCS, KAMILL DANIEL. 2016. Evaluation of burned areas with Sentinel-2 using Snap: the case of Kineta and Mati, Greece, July 2018. 39–50.

LOUIS, J.; DEBAECKER V.; PFLUG B.; MAIN-KNORN M.; BIENIARZ J.; MUELLER-WILM U.; CADAU E.; GASCON F. 2016. SENTINEL-2 SEN2COR: L2A processor for users. *ESA SP SP-740(MAY)*: 9–13.

MALLINIS, G., IOANNIS M.; CHRYSAFI, I. 2018. “Evaluating and comparing SENTINEL 2A and Landsat-8 operational land imager (oli) spectral indices for estimating fire severity in a mediterranean pine ecosystem of Greece.” *GIScience and Remote Sensing* 55(1): 1–18.

MARTÍN, M. P, CHUVIECO, E.; AGUADO, I. 1994. La incidencia de los incendios forestales. Serie Geográfica 7: 23-36.

MATSON, M.; STEPHENS, G.; ROBINSON, J. 1987. Fire detection using data from the NOAA-N satellites. *International Journal Of Remote Sensing* 8(7): 961–70.

MCFEETERS, S K. 1996. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features.” *International Journal Of Remote Sensing* 17(7): 1425–32.

MORENO, J. M. 2011. Presiones sobre la biodiversidad: incendios forestales. *Biodiversidad en España. Base de la sostenibilidad ante el cambio global.* Cap. 3.5: 211–220.

PARKS, S.; DILLON, G.; MILLER, C. 2014. A new metric for quantifying burn severity: The Relativized Burn Ratio. *Remote Sensing* 6(3): 1827–44.

PAUSAS, J. G.; KEELEY, J. 2019. Wildfires as an ecosystem service. *Frontiers in ecology and the environment.* 17(5): 289–95.

QUINTANO, C., A. FERNÁNDEZ-MANSO, AND O. FERNÁNDEZ-MANSO. 2018. Combination of Landsat and Sentinel-2 MSI data for initial assessing of burn severity.” *International journal of applied earth observation and geoinformation* 64 221–25.

RECONDO, C.; WOZNIAK, E.; PÉREZ, C. 2002. Cartografía de zonas quemadas en Asturias durante el período 1991-2001 a partir de imágenes Landsat-TM. *Revista de Teledetección.* 18: 47–55.

REGOS, A. 2018. Cartografía de áreas queimadas en Galicia no século XXI: Presentación do produto e aplicación web mapping: Nova Acta Científica Compostelana 25: 45–53.

ROTETA, E.; BASTARRIKA, A.; PADILLA, M.; STORM, T.; CHUVIECO, E. 2019. Development of a Sentinel-2 burned area algorithm: Generation of a small fire database for sub-Saharan Africa. *Remote Sensing Of Environment*, 222, 1-17

SANDOVAL, B.; RETTIG, D.; REYES, T.; OYARZÚN, M. 2021. Impacto de la contaminación aérea por incendios forestales en la morbimortalidad de la población expuesta. *Neumología Pediátrica*, 16(4), 167-171.

SCHULTZ, M. G.; HEIL, A.; HOELZEMANN, J. J.; SPESSA, A.; THONICKE, K.; GOLDAMMER, J. G.; HELD, A.C.; VAN HET BOLSCHER, M. 2008. Global wildland fire emissions from 1960 to 2000. *Global Biogeochemical Cycles*, 22(2).

SHKOL'NIK, I. M., MOL'KENTIN, E. K., NADEZHINA, E. D., KHLEBNIKOVA, E. I., & SALL, I. A. 2008. Temperature extremes and wildfires in Siberia in the 21st century: the MGO regional climate model simulation. *Russian Meteorology and Hydrology*, 33(3), 135-142.

VARILLAS, B. 2006. Herbívoros contra incendios forestales. *Ars Medica*.22–32.

VÉLEZ, R. 2004. Europa: desarrollo y fuego. II Simposio Sobre Políticas, Planificación Y Economía En La Defensa Contra Incendios Forestales: Una Visión Global: 221–27.

DI VIRGILIO, G., EVANS, J. P., BLAKE, S. A., ARMSTRONG, M., DOWDY, A. J., SHARPLES, J., MCRAE, R. 2019. Climate change increases the potential for extreme wildfires. *Geophysical Research Letters*, 46(14), 8517-8526.