

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE GEOGRAFÍA E HISTORIA



**MÁSTER UNIVERSITARIO EN
TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA**

TRABAJO FIN DE MÁSTER

CURSO 2020 - 2021

**CREACIÓN DE UN VISOR CARTOGRÁFICO PARA EL SEGUIMIENTO
DE LAS ÁREAS AFECTADAS POR GRANDES INCENDIOS
FORESTALES EN GALICIA DE 2017**

**CREATING OF A CARTOGRAPHIC VIEWER FOR MONITORING THE
AFFECTED AREAS BY WILDFIRES IN GALICIA IN 2017**

STRELTSOVA, YULIA

CONVOCATORIA: SEPTIEMBRE

TUTORA: DRA. DE ANDRÉS DE PABLO, NURIA

Departamento de Geografía. Facultad de Geografía e Historia. Universidad Complutense de Madrid (UCM).

RESUMEN:

El presente documento describe el análisis de las áreas quemadas mediante teledetección originadas por los grandes incendios forestales (GIF) en Galicia en 2017 y el desarrollo del visor cartográfico que incluye las capas generadas en dicho análisis. En una primera fase, esta investigación presenta los métodos para la delimitación del área afectada y los cálculos de los índices de vegetación (NDVI y NBR). En una segunda fase, se realiza el análisis de la severidad de los GIF y se genera la cartografía de las áreas quemadas. En una tercera fase, se analiza la recuperación de la vegetación desde la ocurrencia del incendio hasta el año 2020. Por último, se determina la cobertura afectada mediante la base de datos de SIOSE. La metodología se ha desarrollado y descrito para un incendio como ejemplo y posteriormente se ha repetido para otras áreas de GIF, implementándose con la herramienta Model Builder con el objetivo de automatizar el procedimiento del análisis. Como resultado del trabajo se desarrolla el visor cartográfico a través de la herramienta ArcGIS Online y se presentan de forma interactiva y visual todas las capas obtenidas en el análisis anterior. Galicia es la región más afectada por los GIF en España, esto la hace muy interesante y útil como zona de interés en este trabajo. Por otra parte, se ha implementado el visor con perspectiva de su uso en futuras investigaciones sobre incendios forestales en otras regiones.

Palabras clave: *incendios forestales, severidad, visor cartográfico, área quemada, teledetección*

ABSTRACT:

This document describes the analysis of the burned areas by remote sensing caused by the large forest fires (GIF) in Galicia in 2017 and the development of the cartographic viewer that includes the layers generated in this analysis. In a first phase, this research presents the methods for the delimitation of the affected area and the calculations of the vegetation indices (NDVI and NBR). In a second phase, an analysis of the severity of GIFs is carried out and the cartography of the burned areas is generated. In a third phase, the recovery of the vegetation from the occurrence of the fire until 2020 is analysed. Finally, the affected coverage is determined using the SIOSE database. The methodology has been developed and described for a fire as an example and later it has been repeated for other areas of GIF, being implemented with the Model Builder tool in order to automate the analysis procedure. As a result of the work, the cartographic viewer is developed through the ArcGIS Online tool and all the layers obtained in the previous analysis are presented interactively and visually. Galicia is the region most affected by GIFs in Spain, this makes it very interesting and useful as an area of interest in this work. On the other hand, the viewer has been implemented having in mind its use in future research on forest fires in other regions.

Keywords: *wildfires, severity, cartographic viewer, burn area, remote sensing*

INDICE DE CONTENIDO

RESUMEN:	2
1. INTRODUCCIÓN	7
1.1. Los incendios forestales en Galicia.....	7
1.2. Justificación del trabajo	8
1.3. Objetivos del trabajo	9
2. MARCO TEÓRICO	9
2.1. Estudios previos sobre los incendios forestales en Galicia (centrados en el análisis mediante teledetección)	9
2.2. Estudios previos sobre los visores cartográficos	14
2.3. Uso de las herramientas online para hacer análisis de los incendios.....	14
3. AREA DE ESTUDIO.....	17
3.1. Localización.....	17
3.2. Relieve	18
3.3. Clima.....	20
3.4. Vegetación	21
3.5. Usos del suelo	23
3.6. Distribución de población.....	24
4. METODOLOGÍA Y FUENTES	27
4.1. Fuentes utilizadas.....	27
4.2. Selección y descarga de las imágenes.....	29
4.3. Pretratamiento de las imágenes.....	35
4.4. Estimación de superficies afectadas por la quema mediante varios índices espectrales	39
4.5. Delimitación del área quemada.....	43
4.6. Determinación de la severidad de los incendios	47
4.7. Determinación de afección de los distintos usos (SIOSE) y de las cubiertas vegetales.....	49
4.8. Grado de recuperación	50
4.9. Construcción del visor en ArcGIS Online	52
5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
5.1. Resultados obtenidos según el flujo de trabajo para preparar las capas del visor	56
5.2. Visualización de las áreas quemadas de los GIF en el visor construido.....	63
5.3. Discusión: comparación con estudios anteriores	65
5.4. Futuras líneas de investigación	67
6. CONCLUSIONES	68
7. REFERENCIAS	69
ANEXOS	73

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Número de siniestros en España entre 2006 y 2015 años	7
Figura 2: Número de GIF registrados en España los últimos 10 años	8
Figura 3: Etapas de planificación de las actividades combinadas de campo y de teledetección (Hidalgo, 2016)	10
Figura 4: Perfil del país desde GWIS	15
Figura 5: Visualización de las áreas quemadas (GWIS)	15
Figura 6: Análisis de las imágenes en Sentinel Explorer	16
Figura 7: Representación la zona de interés en la web EO Browser	17
Figura 8: Mapa de las divisiones administrativas de Galicia	18
Figura 9: Mapa de relieve de Galicia (Fuente: GradualMap, S.L.)	19
Figura 10: Climograma de Orense (provincia Orense). Fuente: https://es.climate-data.org/	20
Figura 11: Mapa forestal de Galicia	21
Figura 12: Mapa de los distritos forestales (Fuente: Xunta de Galicia, PLADIGA 2017)..	22
Figura 13: Visor cartográfico de la evolución de ocupación de Xunta de Galicia (Fuente: Xunta de Galicia)	24
Figura 14: Densidad de población de Galicia en 2020. Fuente: Instituto Gallego de Estadística (IGE)	26
Figura 15: Gráficos con las zonas quemadas por años y por temporadas (Fuente: GWIS)	29
Figura 16: Página principal del Copernicus Hub (Fuente: https://scihub.copernicus.eu/) ..	32
Figura 17: Descarga de las imágenes de la zona de interés (Fuente: https://scihub.copernicus.eu/)	32
Figura 18: Distribución de las teselas Sentinel-2 en la comunidad de Galicia. Fuente: CNIG con elaboración propia en ArcGIS Pro.	33
Figura 19: Herramienta Layer to KML en ArcMap	34
Figura 20: Visualización de las teselas en Google Earth con los incendios de interés	34
Figura 21: Uso de la herramienta Sen2Cor y su interfaz (SNAP software)	36
Figura 22: Esquema de la herramienta Graph Builder dentro de SNAP	37
Figura 23: Procesamiento de la imagen dentro de Graph Builder	37
Figura 24: Ejemplo del cálculo del NDVI en SNAP	38
Figura 25: Ventana de diálogo de un de los cálculos del NBR realizados en este trabajo en SNAP	39
Figura 26: Recorte de AOI para el análisis del área quemada en ArcMap	40
Figura 27: Recorte del área quemada con la herramienta Clip	40
Figura 28: Ejemplo de zonificación de la cubierta vegetal mediante los valores de NDVI	41
Figura 29: Herramienta Raster Calculator para hacer los cálculos de la diferencia de los índices NDVI	41
Figura 30: Ejemplo del resultado del cálculo dNDVI	42
Figura 31: Ejemplo de la imagen NBR post incendio recortado	42
Figura 32: Ejemplo de segmentación y delimitación del área quemada	44
Figura 33: Resultado de la estadística de los píxeles de la imagen con el NDVI	44
Figura 34: Resultado de la estadística de los píxeles de la imagen con el NBR	44
Figura 35: Herramientas utilizadas en ArcMap para vectorizar la zona afectada por GIF.	45
Figura 36: Ejemplo del mapa final de área afectada por GIF (el municipio As Neves)	46
Figura 37: Ejemplo de la vectorización del área quemada en Google Earth	46

Figura 38: Cálculo de la diferencia de NBR (dNBR) en ArcMap	47
Figura 39: Ejemplo del empleo de la herramienta Reclasify para establecer los rangos de severidad del incendio	48
Figura 40: Descarga el base de datos SIOSE de 2014 (Fuente: CNIG)	49
Figura 41: Recorte SIOSE por el área quemada (Herramienta Clip)	50
Figura 42: Evaluación de severidad basada en los estudios de Key y Benson (2006)	51
Figura 43: Gráfico de la recuperación de la vegetación quemada. Fuente: Philpoteducation. Communities and ecosystems.	51
Figura 44: Proceso de la publicación el mapa web en ArcGIS Online a través de ArcGIS Pro.	53
Figura 45: Presentación de la página principal en ArcGIS Online.....	53
Figura 46: Creación de las ventanas emergentes.....	54
Figura 47: Presentación de la plantilla del Web AppBuilder dentro de ArcGIS Online.....	54
Figura 48: Interfaz de la configuración del visor web.....	55
Figura 49: Visor web cartográfico creado a través de ArcGIS Online.....	56
Figura 50: Versión del mapa final de la severidad	57
Figura 51: Ejemplo de análisis comparativo de la actividad fotosintética antes (a la izquierda) y después del incendio (a la derecha).....	58
Figura 52: Mapa de afección a los distintos usos	59
Figura 53: Mapa de afección a las cubiertas vegetales.....	59
Figura 54: Comparación de la zona quemada entre 2017 y 2020 según dNDVI.	61
Figura 55: Comparación de la severidad post-incendio a corto plazo (la imagen de 2017) y la severidad post-incendio a largo plazo (la imagen de 2020)	61
Figura 56: Mapa de severidad para el 18 de julio de 2020.....	62
Figura 57: Demostración del widget Marcador dentro del visor desarrollado	63
Figura 58: Demostración del widget Filtro dentro del visor	64
Figura 59: Ejemplo de una consulta mediante las ventanas emergentes.....	64
Figura 60: Demostración del widget Swipe dentro del visor	65
Figura 61: Resultado de estadística del área quemada a través de SIG.....	66

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Valores umbrales para diferentes índices según los estudios de Bastarrika et al. (2011).	13
Tabla 2: Distribución por Distritos Forestales y Provincias.....	23
Tabla 3: Distribución de usos del suelo en Galicia (PLADIGA 2017)	23
Tabla 4: Número de habitantes por comarcas (Galicia, 2020) Fuente: Instituto Gallego de Estadística (IGE)	25
Tabla 5: Mayor densidad de población de las comarcas gallegas	25
Tabla 6: Materiales utilizados.....	28
Tabla 7: GIF de Galicia 2017 (Fuente: MITECO)	30
Tabla 8: Litado de los GIF definitivo para el estudio y construcción el visor cartográfico.....	30
Tabla 9: Fechas de las imágenes descargadas	30

Tabla 10: Bandas espectrales para el satélite Sentinel 2 (sensores S2A y S2B) Fuente: MultiSpectral Instrument (MSI) Overview". Sentinel Online. European Space Agency. Retrieved 3 December-2018.....	31
Tabla 11: Distribución de las teselas por municipios	33
Tabla 12: Productos disponibles de Sentinel-2 (Fuente: https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types).....	35
Tabla 13: Criterios para la zonificación de la cubierta vegetal mediante los valores de NDVI. Fuente: Chuvieco, 2015.....	40
Tabla 14: Valores umbral para los índices según el criterio de Bastarrika et al. (2011).....	43
Tabla 15: Resultado de cálculo del valor M	45
Tabla 16: Clasificación de USGS para analizar la severidad de GIF. (Fuente: Key y Benson, 2006).....	48
Tabla 17: Rangos de actividad fotosintética (Fuente: Duncan et al., 1993).....	49
Tabla 18: Superficie afectada por el tipo de usos	60
Tabla 19: Superficie afectada por el tipo de cobertura vegetal	60
Tabla 20: Cálculos de la cobertura en hectáreas y porcentajes de la cobertura por el grado de la severidad post incendio (18 de julio de 2020).....	62
Tabla 21: Comparación las superficies afectadas por los GIF	67

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Fórmula para calcular el índice NDVI	10
Ecuación 2: Fórmula para calcular el índice SAVI	11
Ecuación 3: Fórmula para calcular el índice GEMI	11
Ecuación 4: Fórmula para calcular el índice BAI.....	11
Ecuación 5: Fórmula para calcular el índice NBR	12
Ecuación 6: Fórmula para hacer cálculos de los umbrales.....	12
Ecuación 7: Fórmula para calcular el índice NDVI	38
Ecuación 8: Fórmula para calcular el NBR.....	39
Ecuación 9: Fórmula para calcular la delta de NDVI.....	41
Ecuación 10: Fórmula para calcular el índice M.....	43
Ecuación 11: Fórmula para calcular la delta de NBR	47
Ecuación 12: Fórmula para calcular la delta de NDVI.....	51
Ecuación 13: Fórmula para calcular la delta de NBR post-incendio.....	52

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Los incendios forestales en Galicia

Los incendios forestales en Galicia son unos de los desastres naturales medioambientales que afectan el territorio gallego con frecuencia (Dorrego y Álvarez, 2009). Es una Comunidad Autónoma con unas importantes características forestales y en proporción la que cuenta con una mayor cantidad de masa forestal. Según los registros forestales gallegos, 1.405.451 ha están arboladas.

Frente a lo que cabe esperar de una región como Galicia con un clima general húmedo (de tipo oceánico) y una vegetación siempre verde, donde no parecen probables los incendios forestales (Fernández-Couto, 2005), la experiencia nos demuestra la existencia de incendios especialmente virulentos. Esto es así debido a otros factores favorables que influyen en la generación y propagación del fuego, como pueden ser relieves abruptos, existencia de sequías estivales, áreas con predominio de vegetación pirófitas por intervención antrópica.

De acuerdo a los datos oficiales y a los estudios anteriores sobre incendios y áreas afectadas, España posee una de las bases de datos sobre incendios forestales más completa de Europa: la Estadística General de Incendios Forestales (EGIF), que recoge información desde 1968.

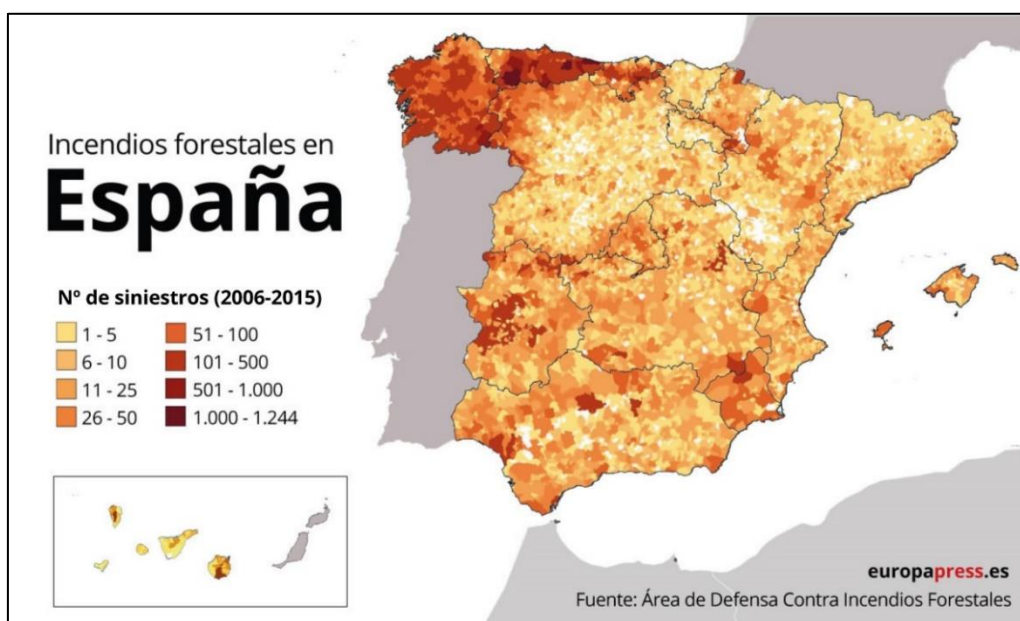


Figura 1: Número de siniestros en España entre 2006 y 2015 años.

Como ejemplo, en el mapa de incendios (*Figura 1*) se aprecian las zonas más afectadas durante una década, entre los años 2006 y 2015. En este ejemplo se puede observar cómo Galicia fue durante este periodo la región más afectada por los incendios.

A la hora de la realización de los estudios de las zonas afectadas por causa de los incendios forestales hay que diferenciar 3 tipos de incendios (Fernández-Couto, 2005):

- Conatos: los incendios forestales con una superficie afectada inferior o igual a 1 ha;
- Incendios: los que afectan a más de 1 ha de superficie;

- Grandes Incendios Forestales (GIF) son aquellos con una superficie afectada igual o superior a 500 ha.

En los últimos 10 años España ha sufrido mucho por causa de los GIF. El año con más impacto fue el 2012 (*Figura 2*). El número de los GIF fue de 39 según la estadística de incendios forestales (Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2020).

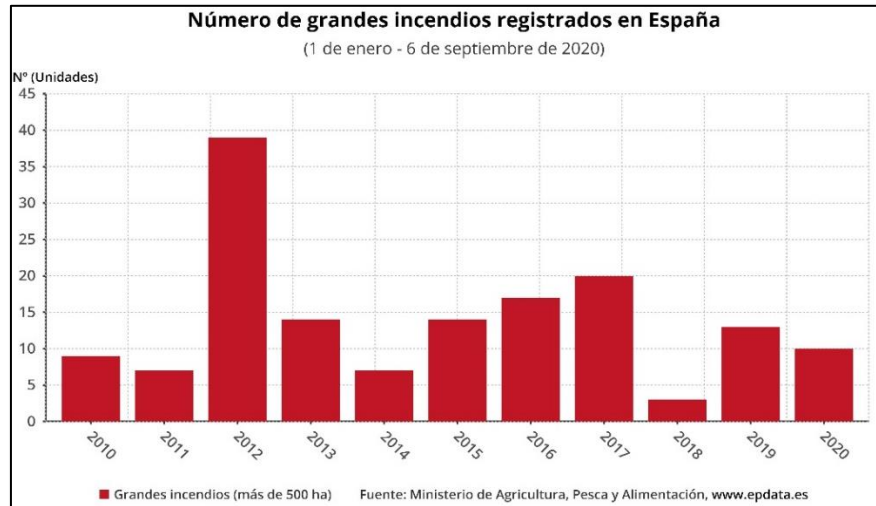


Figura 2: Número de GIF registrados en España los últimos 10 años

¿Qué podemos hacer para disminuir el riesgo de grandes incendios los cuales provocan muchos daños al medioambiente? Con el objetivo de disponer un sistema de prevención eficiente es de gran ayuda la realización de estudios de las áreas quemadas, la obtención de la cartografía de dichas áreas y el estudio de la posterior evolución de las zonas afectadas. Los métodos en dichos estudios se basan principalmente en Tecnologías de la Información Geográfica (TIG), las cuales son aplicables en multitud de ámbitos: en el manejo de la información obtenida en los trabajos de campo, en el procesado de los datos procedentes de diferentes satélites en y la realización de la cartografía de superficies quemadas y su posterior integración en SIG (Dorrego y Álvarez, 2009).

1.2 Justificación del trabajo

El área del noroeste de España es usualmente la región más afectada por incendios forestales. El estudio de los incendios de Galicia ayuda a realizar el pronóstico de las zonas con altos niveles del riesgo, analizar la vegetación afectada y el impacto a nivel económico (infraestructuras, cultivos y etc.) e incluso humano (pérdida de vidas) en la población. El análisis de la evolución de estas zonas y de la vegetación recuperada ayuda a estimar la necesidad de mejorar la reforestación en la zona de estudio.

El desarrollo de un visor web es una parte muy importante en el análisis de la zona quemada con el objetivo de predecir la recuperación vegetal, especialmente si se trata de los GIF. El visor permite hacer consultas en línea y trabajar con una cantidad importante de datos. El acceso gratuito a los servicios de información de *Copernicus* permite descargar imágenes y

hacer un análisis de las zonas afectadas por GIF. Debido a esto, se considera que este trabajo se podría utilizar como plantilla para futuras investigaciones.

1.3 Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este estudio es crear un visor web que presente la información geográfica derivada del seguimiento mediante percepción remota de las áreas afectadas por GIF en la comunidad autónoma de Galicia en el año 2017. Para lograr este objetivo general se plantean los siguientes objetivos específicos:

- delimitar las áreas quemadas mediante la aplicación de dos índices espectrales utilizados conjuntamente;
- generar la cartografía de severidad para las áreas afectadas;
- determinar los tipos de coberturas afectados;
- analizar la evolución de la vegetación recuperada desde la ocurrencia del incendio hasta 2020;
- automatizar el procedimiento de análisis de un incendio y crear un algoritmo en Model Builder para aplicarlo a otras superficies quemadas.

El visor interactivo es una forma de comunicación eficaz de la información que puede ser útil para difundir el conocimiento que se va adquiriendo de la evolución del área afectada.

2. MARCO TEÓRICO

Una vez establecidos los objetivos del trabajo, se ha realizado, en primer lugar, una revisión bibliográfica de los estudios previos sobre los incendios forestales de Galicia. En segundo lugar, se han revisado las herramientas y sitios web con contenido específico para hacer el análisis de los GIF de España y en particular, en Galicia.

2.1. Estudios previos sobre los incendios forestales en Galicia (centrados en el análisis mediante teledetección)

Los estudios sobre la recuperación de la vegetación después de los GIF describen la utilización de dos metodologías complementarias: análisis a través de los trabajos de campo y otro, a través de la teledetección. Para el estudio de campo se analizan las cenizas respecto al efecto de erosión con el objetivo de entender mejor la evolución de la vegetación después del incendio (Jordan, 2010). Actualmente no existe ningún método que permita automatizar el proceso y analizar la recuperación de la vegetación de manera rápida y eficaz, utilizando como única fuente de entrada la cartografía. Para realizar el análisis completo se necesita

una posterior evaluación en campo, a través del método combinado (Hidalgo, 2016). En la *Figura 3* se aprecia las etapas principales para la evaluación de suelo sufrido por un incendio.

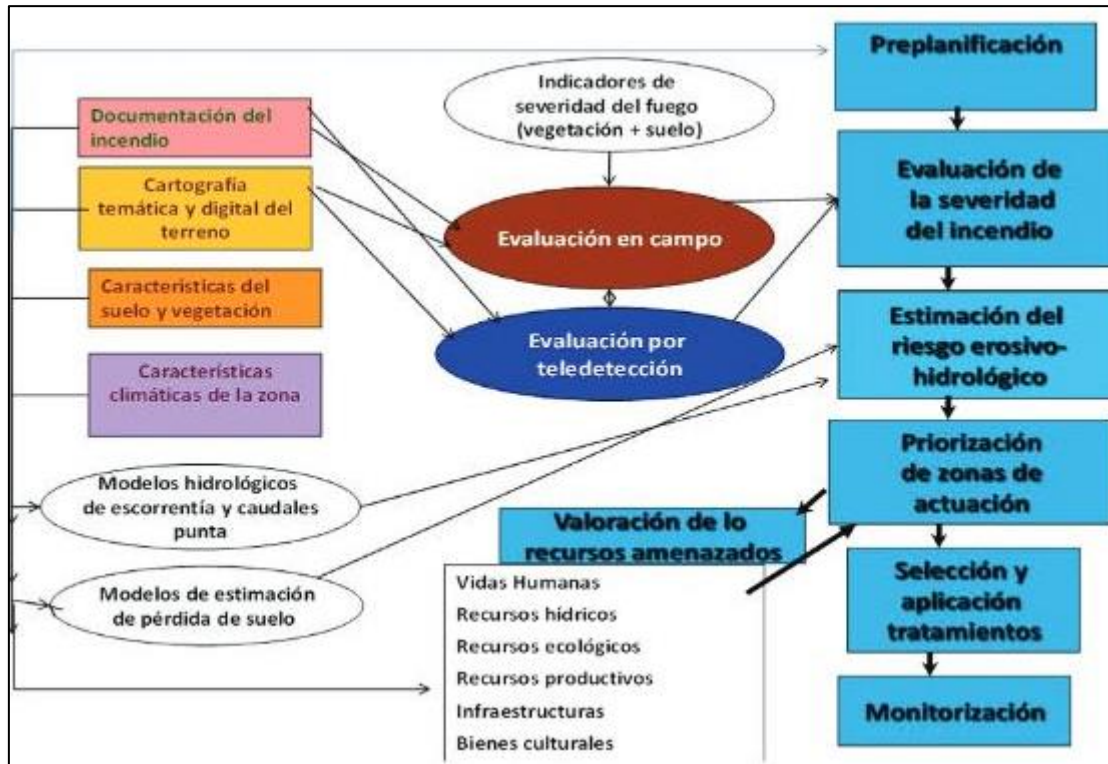


Figura 3: Etapas de planificación de las actividades combinadas de campo y de teledetección (Hidalgo, 2016)

El concepto más relevante de este análisis es la selección de los índices espectrales adecuados para delimitar la zona quemada. En la bibliografía científica se ha generalizado el uso de ciertos índices que relacionan las bandas del rojo y del infrarrojo:

- *El NDVI* – (Normalize Difference Vegetation Index/Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) que se utiliza para diferenciar la zona quemada y realizar el análisis de la evolución de la vegetación. Se calcula con la siguiente fórmula (Rouse et al., 1973):

$$NDVI = \frac{NIR - Rojo}{NIR + Rojo}$$

donde:

NIR: valor de la reflectividad en el infrarrojo cercano,

Rojo: valor de la reflectividad en la banda del rojo.

Ecuación 1: Fórmula para calcular el NDVI

- *El SAVI* (Soil Adjusted Vegetation Index/Índice de Vegetación Ajustado al Suelo) se utiliza si es necesario diferenciar la zona con vegetación dispersa (Huete, 1988). Se calcula con la siguiente fórmula:

$$\text{SAVI} = \left(\frac{\text{NIR} - \text{Rojo}}{\text{NIR} + \text{Rojo} + L} \right) \times (1 + L)$$

donde:

SAVI: Soil Adjusted Vegetation Index,

NIR: valor de la reflectividad en el infrarrojo cercano,

Rojo: valor de la reflectividad en la banda del rojo,

L = 0,5; factor de corrección de la luminosidad del suelo determinado por Huete (1988).

Ecuación 2: Fórmula para calcular el SAVI

- *El GEMI (Global Environmental Monitoring Index/Índice de Seguimiento Ambiental Global) fue desarrollado para evitar la influencia del suelo y de las condiciones atmosféricas (Pinty y Verstraete, 1992)*

$$\text{GEMI} = \eta (1 - 0.25\eta) - \left(\frac{\text{Red} - 0.125}{1 - \text{Red}} \right)$$

Donde η :

$$\eta = \frac{2(\text{NIR}^2 - \text{Red}^2) + 1,5\text{NIR} + 0,5\text{Red}}{\text{NIR} + \text{Red} + 0,5}$$

donde

NIR: valor de la reflectividad en el infrarrojo cercano,

Red: valor de la reflectividad en la banda del rojo.

Ecuación 3: Fórmula para calcular el GEMI

Según Martín y Chuvieco (1998) este índice es más apropiado que el NDVI, en su zona de estudio, para el análisis de las áreas quemadas.

- *El BAI (Burn Area Index/Índice del Área Calcinada) fue diseñado especialmente para la definición de las áreas quemadas y se calcula como la distancia espectral entre un píxel y un valor de referencia (0,1 para rojo y 0,06 para infrarrojo cercano) (Martin, 1998).*

$$\text{BAI} = \frac{1}{(0.1 - \text{Red})^2 + (0.06 - \text{NIR})^2}$$

donde

NIR: valor de la reflectividad en el infrarrojo cercano,

Red: valor de la reflectividad en la banda del rojo.

Ecuación 4: Fórmula para calcular el BAI

A parte del potencial de las bandas rojo e infrarrojo, se han analizado otras posibilidades que emplean la banda del infrarrojo de onda corta (SWIR) para cartografiar las zonas dañadas por incendios. Es el caso del *NBR* (Normalized Burn Ratio/Índice de Calcinación Normalizado). Este índice fue desarrollado para trabajar específicamente con áreas quemadas y ha sido utilizado por Montorio (2014) y Dorrego (2009) para hacer estudios de severidad de incendio. Además, este índice ha sido aplicado para estudiar áreas dañadas por GIF (en Galicia como un ejemplo). Para delimitar el área quemada se utiliza el *NBR* post-incendio (García y Chuvieco, 2004):

$$\text{NBR} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$$

donde

NIR: valor de la reflectividad en el infrarrojo cercano,

SWIR: valor de la reflectividad en el infrarrojo de onda corta.

Ecuación 5: Fórmula para calcular el índice *NBR*

Otro grupo de trabajos muy recientes son los que tratan la determinación de los umbrales (*los píxeles semilla*) para delimitar el área quemada mediante procesos de segmentación de la imagen en píxeles quemados y no quemados. En esta línea, entre los estudios, destacan las investigaciones de Bastarrika y Chuvieco (2011) y García y Chuvieco (2004) y que consideran dos fases en la implementación del método. La primera fase se dedica la selección “píxeles semilla”, es decir, los píxeles con valores más altos que se consideran afectados por la quema y se obtienen a través de los cálculos estadísticos (media y desviación típica) realizados sobre la diferencia de los índices. La segunda fase, cuyo objetivo es la reducción de los errores de omisión, consiste en hacer uso de los píxeles quemados definidos en la primera fase como “semilla” y determinar la semejanza espectral con los píxeles vecinos, con el fin de clasificar como “quemados” o “no quemados” los píxeles que se encuentra en un radio de dos kilómetros en torno a la “semilla” (Oliva, 2008).

El ejemplo de los cálculos para obtener los umbrales fue aplicado por Quintano et al (2000) y se aprecia en la siguiente fórmula:

$$\text{NDVI}_{\text{pre}} - \text{NDVI}_{\text{post}} > m_{\text{pre-post}} + 2s_{\text{pre-post}}$$

donde:

NDVI_{pre}: índice de vegetación calculado en la imagen pre-incendio,

NDVI_{post}: índice de vegetación calculado en la imagen post-incendio,

m_{pre}: el valor de media sobre el área antes de incendio,

m_{post}: el valor de media sobre el área quemada,

s_{pre}: el valor de desviación típica sobre el área antes de incendio,

s_{post}: el valor de desviación típica sobre el área quemada.

Ecuación 6: Fórmula para hacer cálculos de los umbrales

Los cálculos se diferencian dependiendo del índice y de los valores de media y desviación típica. Los resultados obtenidos por Bastarrika et al. (2011) según sus algoritmos de establecer los umbrales, utilizando 2 fases de análisis son siguientes para diferentes índices (Tabla 1):

Índice	Valor umbral
dBAI	> 144,3835
dNDVI	< -0,17767
post NBR	< -0,15006
dGEMI	< -0,11578

Tabla 1: Valores umbrales para diferentes índices según los estudios de Bastarrika et al. (2011).

El concepto más destacable en el análisis de daños a la vegetación en incendios forestales es *el grado de severidad*. Según Montorio (2014) se distingue entre severidad del fuego (*fire severity*) y severidad del incendio a corto plazo (*burn severity*). La severidad del fuego favorece al análisis post-incendio y ayuda a entender cómo evoluciona la vegetación en la zona dañada. Las áreas de severidad alta sufren por erosión, pérdida de agua y destacan por una recuperación lenta de la vegetación. Las zonas afectadas por una severidad baja no sufren o tienen probabilidad baja de sufrir procesos de degradación de suelo, por lo que la recuperación de la vegetación procede de forma más rápida (Jordan, 2010).

Los estudios anteriores sobre la severidad del fuego en el proceso de recuperación consisten en dos fases: evaluación visual en campo y evaluación mediante técnicas de teledetección. La severidad obtenida mediante trabajos en campo se mide a través de la evaluación de la pérdida de vegetación. Para combinar diferentes métodos se aplica el índice *CBI (Composite Burn Index)* que incluye los parámetros especificados como conjunto de variables y permite evaluar la influencia del fuego dentro de los estratos verticales, obteniendo los valores a nivel de sotobosque (Montorio, 2014).

La severidad evaluada a través de los métodos de teledetección se realiza mediante imágenes después de incendio con una fecha muy aproximada a la del final del incendio. Posteriormente se evalúa la severidad post-incendio con la fecha actual para comparar y predecir la recuperación de la vegetación dañada. Con la cartografía de la severidad se pueden establecer los valores de la recuperación vegetal (Montorio, 2014).

Los trabajos de campo son bastante más lentos y costosos, aunque son un método con el cual se pueden alcanzar resultados más precisos y completos. En este trabajo se utiliza el método de delimitación de área quemada y posterior análisis de recuperación de la vegetación solo mediante el uso de SIG y teledetección. La segunda parte de la metodología sobre el análisis de campo no se realiza en este trabajo.

2.2. Estudios previos sobre los visores cartográficos

Los estudios anteriores sobre el desarrollo de visores cartográficos han mostrado que el mundo digital y las nuevas tecnologías nos permiten visualizar información geográfica interactivamente de manera que se puedan realizar análisis online, consultas, búsquedas, etc. y con ello tener la información actualizada (Martorell, 2019).

Basándose en los estudios de Cotizo (2015), después del año 2007 nació el fenómeno *Neogeografía*, que significa Nueva Geografía (New Geography), por varias razones: el acceso público al internet, el desarrollo de los visores básicos (Google Maps, Open Street Maps) y sistemas GPS (Posicionamiento Global). Martorell (2019) destaca las diferentes finalidades de estos visores a través de ejemplos:

- Google Maps fue creado en 2005 y sirve para acceder a la información geográfica;
- OpenStreet Maps fue desarrollado en 2004 como proyecto colaborativo, donde cualquier persona puede añadir información geográfica en el mapa base interactivo;
- ArcGIS Online fue lanzada en 2014 es una herramienta potente para generar visores;
- Leaflet fue elaborado en 2011 como herramienta para desarrollar un visor, integrándolo en una página personal.

Resumiendo las ideas de Martorell (2019), los visores pueden clasificarse en tres grupos:

- a) los visores muy sencillos que presentan poca información geográfica;
- b) los visores más complejos que permiten manejar datos masivos de manera rápida e intuitiva.
- c) las herramientas específicas para elaborar y embeber visores. Por ejemplo, Nieto (2013) emplea GeoServer como un servidor de mapas, Martorell (2019) utiliza Leaflet para elaborar su propio visor.

Se puede concluir que los estudios anteriores están basados en la creación de visores complejos para integrarlos posteriormente en los lugares web del usuario.

2.3 Uso de las herramientas online para hacer análisis de los incendios

Para analizar los GIF existen muchas herramientas online que facilitan información sobre incendios forestales. Las más destacadas son:

- *Global Wildfire Information System (GWIS)* es un portal de gráficos, tablas e información estadística sobre incendios de cualquier país (*Figura 4*). Para empezar, hay que elegir el país objetivo y luego buscar la información de interés en las pestañas de la izquierda.

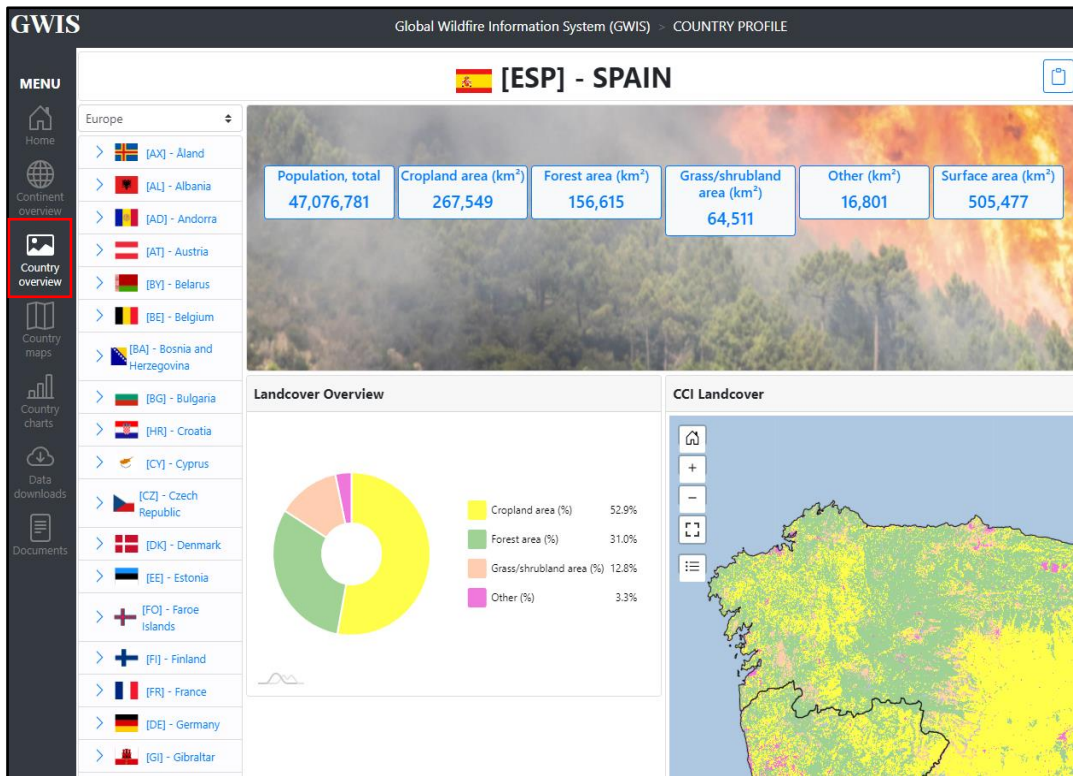


Figura 4: Perfil del país desde GWIS

Esta herramienta permite visualizar las zonas quemadas *por meses y por años*, lo que facilita la selección de las imágenes, tal como vemos en la Figura 5.

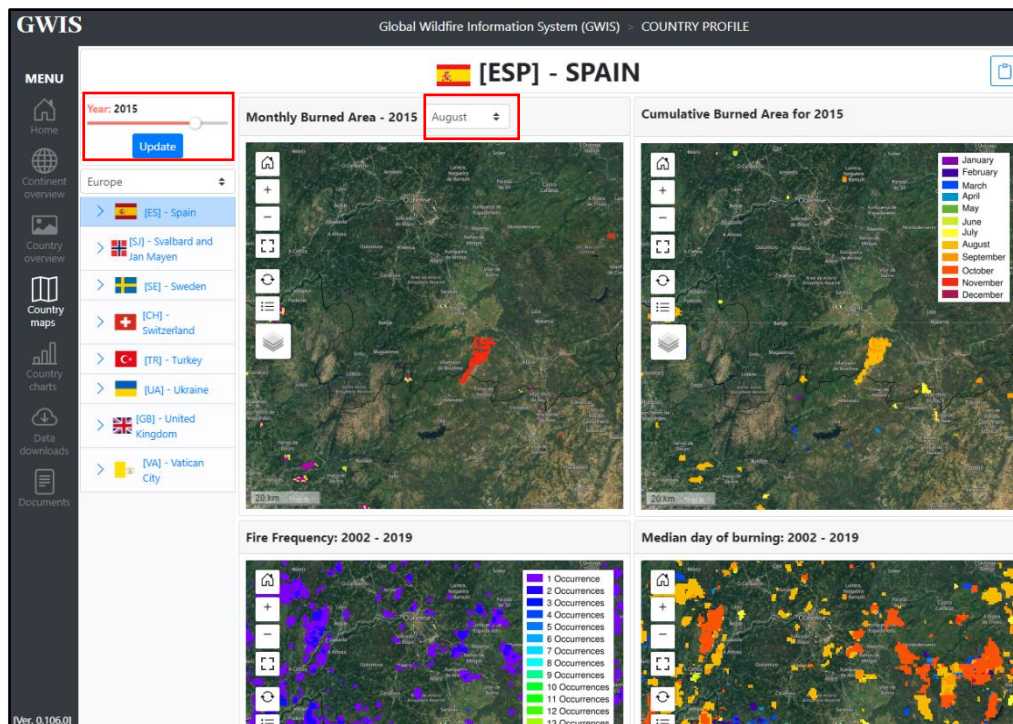


Figura 5: Visualización de las áreas quemadas (GWIS)

- *Sentinel Explorer (SE)* permite visualizar las imágenes en varios modos (en el color Natural, en el Falso color, en el color para ver agricultura o vegetación). Además, esta herramienta permite visualizar los índices automáticamente (como *NDVI* o *NBR*) (*Figura 6*).

Adicionalmente, se pueden añadir los datos desde ArcGIS Online y hacer el análisis de las imágenes en el modo en línea para comparar y examinar la zona de estudios y los niveles de la recuperación de la vegetación.

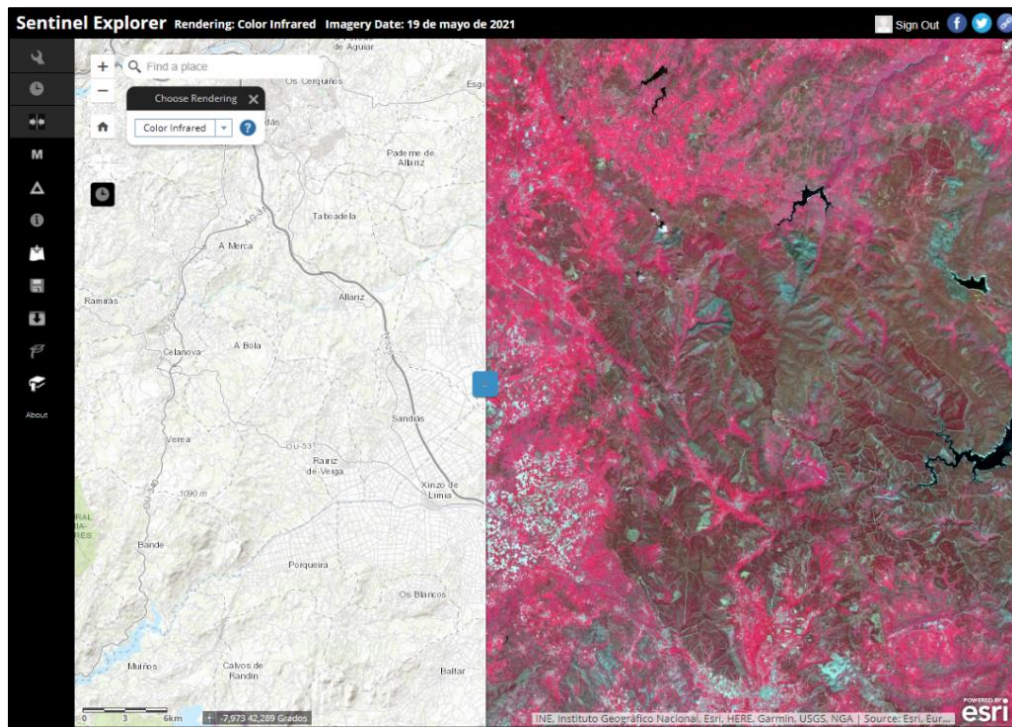


Figura 6: Análisis de las imágenes en Sentinel Explorer

- *EO Browser (EOB)* es una herramienta para buscar imágenes de diferentes años y posteriormente hacer una comparación para analizar la zona afectada. EOB como otras plataformas online permite visualizar en diferentes colores, además de los índices. Lo más interesante que nos ofrece esta herramienta es crear video en el formato *.gif* para observar la zona de interés afectada por GIF de los diferentes años (*Figura 7*).

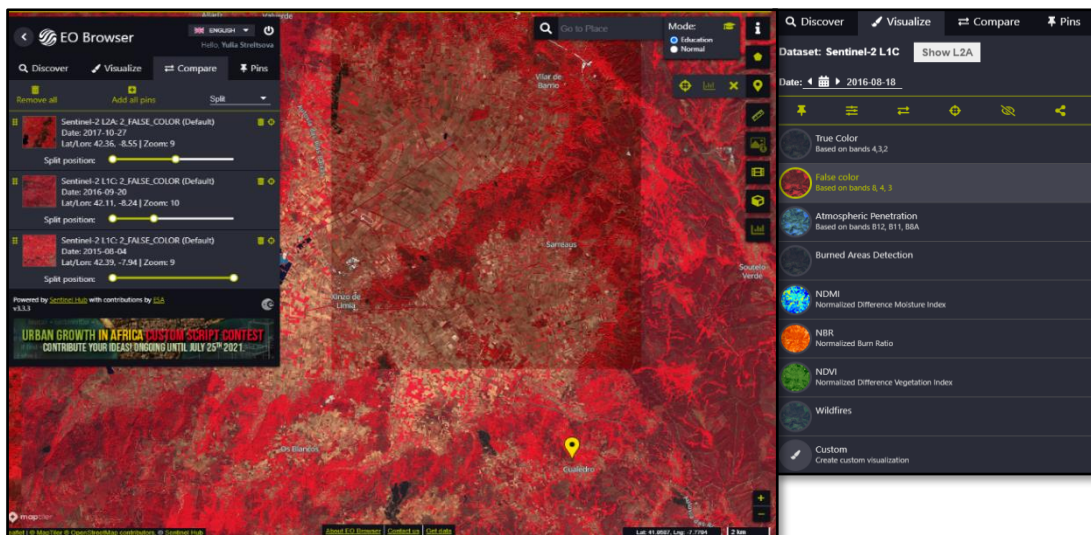


Figura 7: Representación la zona de interés en la web EO Browser

3. AREA DE ESTUDIO

Una vez incluido el marco teórico de los estudios previos sobre incendios forestales a través de técnicas SIG, es pertinente situar la zona de estudio sobre la que se ha aplicado la metodología, antes de describir la misma. Este capítulo consiste en seis partes: una primera en la que se incluye la descripción de la localización de Galicia y otras cinco que describen las características del territorio como relieve, clima, vegetación, usos de suelo y la distribución de la población.

3.1 Localización

Galicia se localiza en el noroeste de la Península Ibérica y se divide administrativamente en 4 provincias: La Coruña, Pontevedra, Orense y Lugo (Figura 8). Cada provincia tiene muchos municipios (o localidades). La provincia de La Coruña consiste en 93 localidades, Lugo – 67, Orense - 92 y Pontevedra – 62. La capital de Galicia es Santiago de Compostela.

Geográficamente, se localiza entre el océano Atlántico al oeste (las provincias de La Coruña y Pontevedra) y el mar Cantábrico al norte (las provincias de La Coruña y Lugo). El sur de Galicia limita con Portugal y con Asturias y Castilla-León al este. Aparte del territorio continental, Galicia tiene una parte insular que contiene las Islas Cíes, Ons, Illa de Arousa, las Sisargas y otras menos conocidas y pobladas.

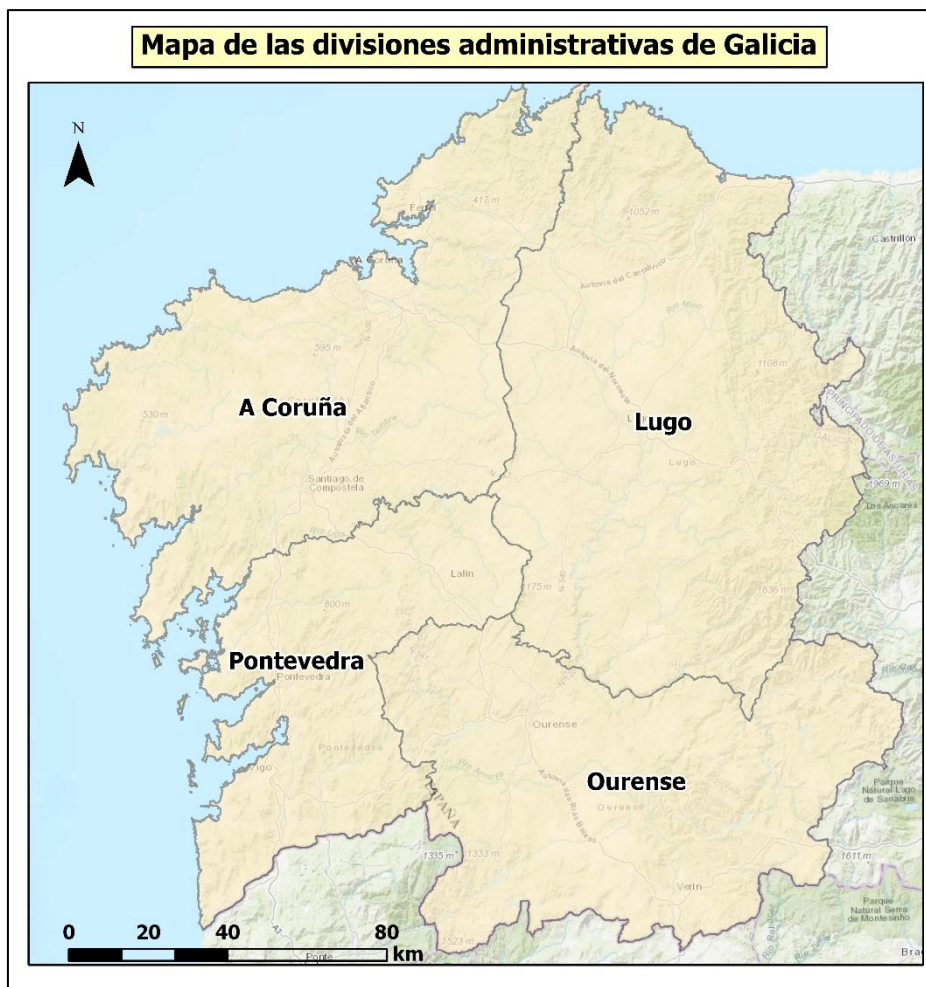


Figura 8: Mapa de las divisiones administrativas de Galicia

3.2 Relieve

A escala regional y atendiendo a su altitud en Galicia se distinguen claramente dos unidades muy contrastadas: la costa y el interior montañoso (Franco, 2015). La parte costera cambia su perfil con la distancia y desde las altitudes pequeñas de 500 metros el relieve alcanza los niveles más altos sobre el mar, de unos 2000 metros, en la parte inferior de la comunidad.

Los elementos más característicos del relieve costero de Galicia son las rías. Entre esas rías se distinguen dos zonas diferentes: Rías Bajas y Rías Altas (Yepes, 2002). Las Rías Altas se localizan en el litoral cantábrico, en la zona de La Coruña/Ortigueira y presentan acantilados. Las rías más extendidas se encuentran en Rías Bajas, al sur de Finisterre, en la costa atlántica, tienen mayor profundidad.

El relieve de Galicia está representado por la cadena de sierras que se extiende en toda la Península. Todo el territorio gallego está labrado sobre el macizo galaico (incluso el litoral).

Dentro de este macizo se diferencian tres regiones: Meseta de Lugo con altitudes medias de 500 metros, la Tierra Cha y al sur de la depresión de Monforte. donde se encuentran los ríos Miño y Sil. En el interior, las mayores altitudes se localizan en el reborde oriental, en la cadena de las montañas galaico-leonesas. Destacan aquí las Sierras de Eixe y Secundeira y con la máxima altitud en Peña Trevinca (2124 m) (Figura 9). Hacia el oeste estas sierras se ven interrumpidas por una serie de fosas miocénicas por las que discurren los principales ejes fluviales, y por superficies ligeramente elevadas como la superficie de Chantada. Hacia el litoral se distingue otra unidad elevada, labrada en granitos de grano fino y cuarcitas: la dorsal gallega. La máxima altitud de esta alineación montañosa norte-sur es Faro (1187 m). La dorsal queda separada del bloque litoral por la fosa Carballo-Tuy. La presencia de pendientes elevadas favorece la propagación del fuego.

En la Galicia continental predominan las colinas pero también existen valles y cañones. El ejemplo más distintivo son los cañones del río Sil. El río Sil es el segundo río de Galicia por longitud y es el principal afluente del río Miño, el más grande de toda Galicia (Franco, 2015). El punto más septentrional de Galicia es Estaca de Bares que está situado en la frontera entre el golfo de Vizcaya y el océano Atlántico. Galicia cuenta con aproximadamente 316 archipiélagos e islas individuales en su parte costera.

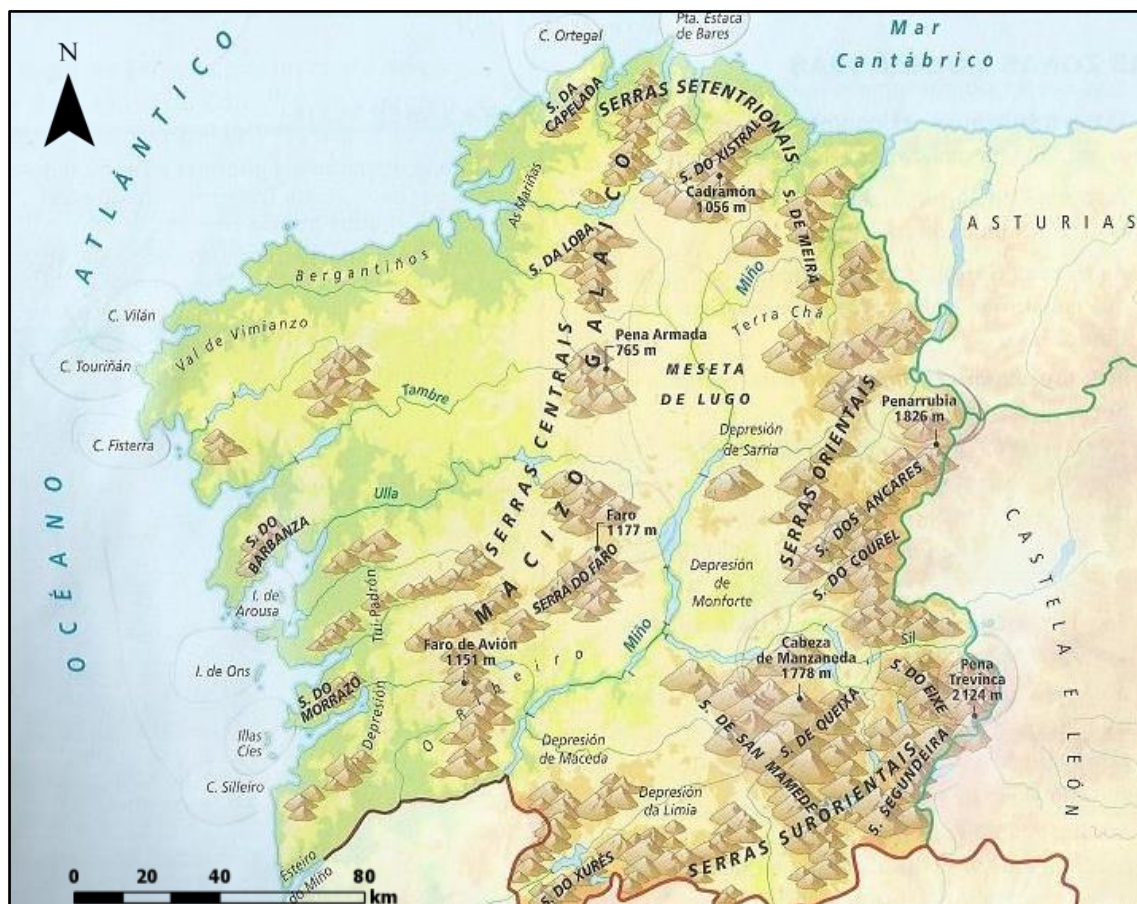


Figura 9: Mapa de relieve de Galicia (Fuente: GradualMap, S.L.)

3.3 Clima

El clima de Galicia es templado y pertenece al tipo atlántico con muchas precipitaciones durante todo el año, excepto en verano: el descenso de las precipitaciones en la época de calor favorece el fuego. Las temperaturas medias son: de invierno 8,5°C, de verano 19°C, de otoño 11°C y de primavera 15°C.

El clima de las diferentes regiones tiene sus propias características. Se diferencian las siguientes zonas:

- la zona de las Rías Bajas y la parte continental de La Coruña que presenta un clima más lluvioso y con menos días soleados;
- la costa de la provincia de Lugo que tiene las temperaturas más bajas de la región;
- el clima del valle del río Miño que pertenece al clima templado;
- la zona de la ciudad de Orense, que está rodeada de montañas. Allí las temperaturas en verano pueden alcanzar las máximas que se registran en otras regiones más calurosas de España. (Gutián, 2007).

Basándose en la clasificación de Köppen, Galicia tiene un clima de tipo *Csb* en la parte interior de la península, que significa un clima mediterráneo de verano seco y templado, y el *Cfb* en la parte nórdica y oeste gallega, que significa un clima templado sin estación seca y con verano templado (Gutián, 2007).

En la Figura 10 se aprecia el climograma de la ciudad Orense (Climate-Data.org). De acuerdo con la clasificación de Köppen, su clima se clasifica como *Csb*. La temperatura media es 12.7 °C y la precipitación total anual es de 952 mm. El mes más lluvioso es octubre con precipitaciones medias de 118 mm. Los meses con menos precipitaciones son julio y agosto de 27 mm aproximadamente. Este déficit hídrico favorece el desarrollo de GIF en la región.

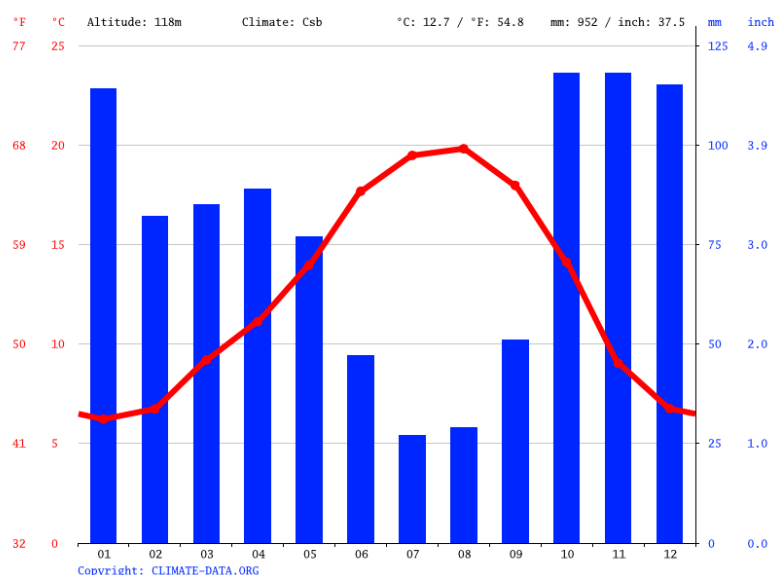


Figura 10: Climograma de Orense (provincia Orense). Fuente: <https://es.climate-data.org/>

3.4 Vegetación

El clima gallego se relaciona directamente con la presencia del bosque perennifolio (principalmente coníferas). Por la influencia humana y la alta demanda de madera se multiplicaron las plantaciones de árboles de rápido crecimiento e importantes beneficios económicos: el pino y eucalipto (CNIG, 2020).

El pino gallego se extiende por las tierras bajas y ocupa las pendientes más cercanas a la costa.

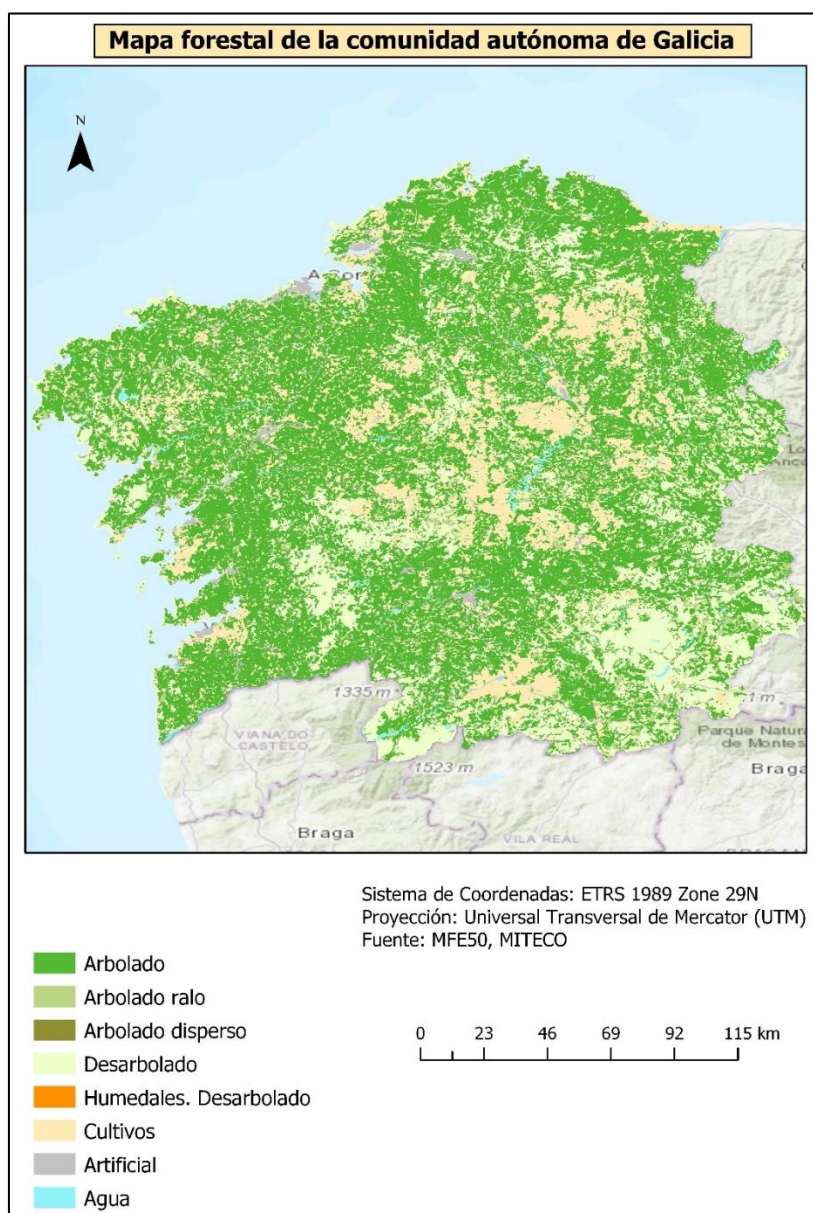


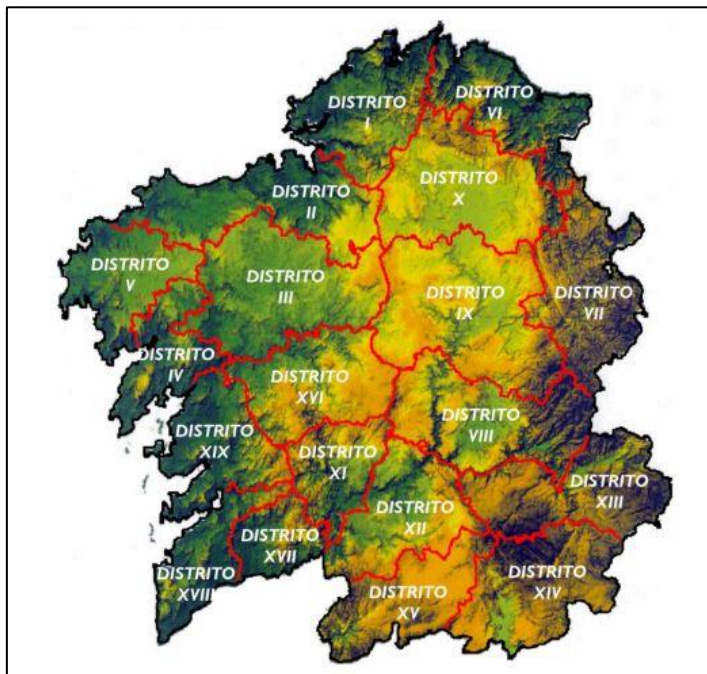
Figura 11: Mapa forestal de Galicia

La especie principal del bosque gallego es el roble. Se distinguen dos tipos diferentes: *Quercus pyrenaica* (melojo o rebollo, también se conoce como roble negro)¹ y *Quercus robur* (roble común)². Este tipo de vegetación domina en el piso basal. El piso montano se presenta con *Corylus avellana* (avellano) y *Fagus sylvatica* (haya) en las regiones más húmedas. Además, se puede encontrar *Corylus avellana* (avellano), *Ilex aquifolium* (acebo), *Taxus baccata* (tejo) y *Acer* (arce) en este piso. En el sotobosque la especie dominante es *Pteridophyta* (helecho). En el piso subalpino aparece *Betula pendula* (abedul) con *Ulmus minor* (olmo), *Corylus avellana* (avellano), *Flaxinus* (fresno) y *Ilex aquifolium* (acebo).

El bosque gallego ha sufrido frecuentes incendios forestales durante décadas. Plantaciones eucaliptos y pinos cubren 80% de la masa forestal de Galicia. La especie *Pinus* pertenece al tipo pirófito que significa la especie que tiene mayor afinidad al fuego y favorece la propagación a los incendios. *Eucalipto globulus* tiene cierta resistencia al quemado, excepto las ramas secas. Los bosques robles cubren 20% de la masa forestal y tienen resistencia natural al fuego (Bastos, 2015).

Los matorrales representan 43% de la superficie forestal y han sufrido por los incendios por causa de la intervención humana. Las especies que predominan en Galicia son *Calluna vulgaris* (brezo) y *Ulex europaeus* (tojo) (Bastos, 2015).

Galicia se divide en 19 distritos forestales que se toman unidades de gestión. En estas unidades se determinan las ZAR (Zonas de Alto Riesgo) (Dorrego y Álvarez, 2009)



Esas zonas se delimitan en el documento de Plan de Prevención y defensa contra los incendios forestales de Galicia (PLADIGA) (Figura 12).

La distribución por distritos forestales y provincias se aprecia en la Tabla 2:

Figura 12: Mapa de los distritos forestales (Fuente: Xunta de Galicia, PLADIGA 2017)

¹ En Galicia el roble negro se conoce como *cerquiño* o *cerqueiro*.

² Esta variedad recibe el nombre *carballo* en Galicia

DISTRIBUCIÓN POR DISTRITOS FORESTALES Y PROVINCIAS			
La Coruña		Lugo	
Distrito I	Ferrol	Distrito VI	A Mariña - Lucense
Distrito II	Bergantiños - M. Coruñas	Distrito VII	Fonsagrada - Os Ancares
Distrito III	Santiago - Meseta Interior	Distrito VIII	Terra de Lemos
Distrito IV	Barbanza	Distrito IX	Lugo - Sarria
Distrito V	Fisterra	Distrito X	Terra Chá
Orense		Pontevedra	
Distrito XI	O Ribeiro - Arenteiro	Distrito XVI	Deza - Tabeiros
Distrito XII	Miño - A Armoia	Distrito XVII	O Condado - A Paradanta
Distrito XIII	Valdeorras - Trives	Distrito XVIII	Vigo - Baixo Miño
Distrito XIV	Verín - Viana	Distrito XIX	Caldas - O Salnés
Distrito XV	A Limia		

Tabla 2: Distribución por Distritos Forestales y Provincias

3.5 Usos del suelo

La cobertura de uso del suelo se clasifica según *la base de datos de ocupación del suelo SIOSE*. La identificación del uso es muy importante para planificar actividades contra GIF porque cada tipo de uso del suelo tiene comportamiento diferente al reaccionar al fuego. Basándose y la estadística del Cuarto Inventario Nacional Forestal (IFN4) 69% de la superficie total de Galicia pertenecen al uso forestal que son 2 030 681, 03 ha. La distribución de usos del suelo en Galicia se puede observar en la Tabla 3 (PLADIGA, 2017):

USO DEL SUELO	SUPERFICIE (HA)	%
Forestal	2.030.681,03	68,66
Agricultura	822.626,86	27,82
Elementos artificiales	81.520,59	2,76
Humedal	2.311,58	0,08
Áreas acuáticas	20.307,41	0,69
Total	2.957.447,47	100

Tabla 3: Distribución de usos del suelo en Galicia (PLADIGA 2017)

Xunta de Galicia se ha desarrollado el visor cartográfico con el mapa base de SIOSE para hacer seguimiento de evolución de usos del suelo (Figura 13).

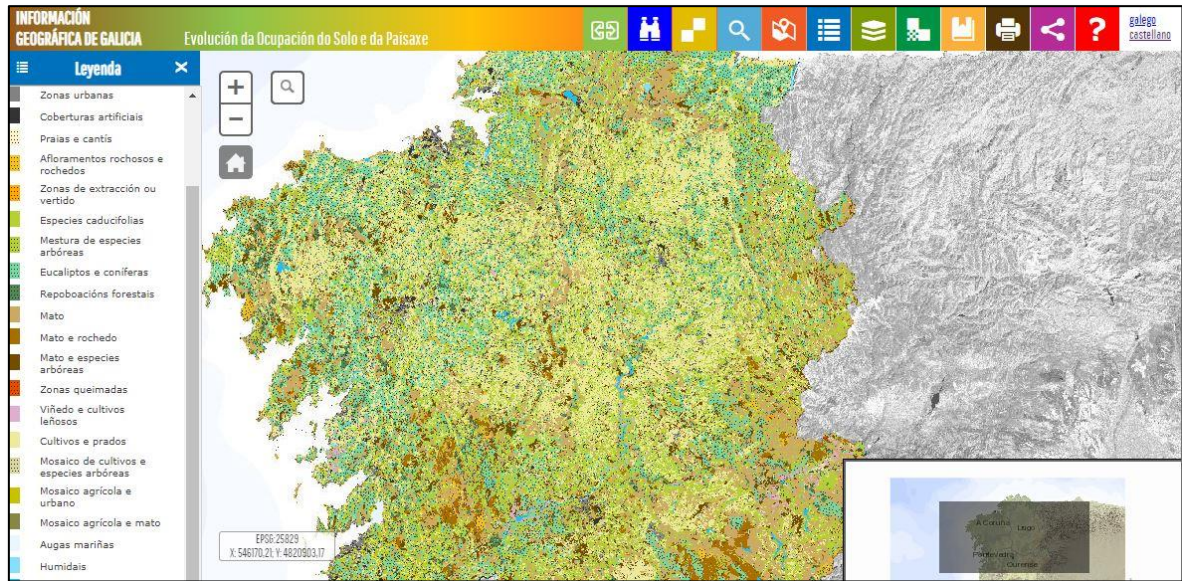


Figura 13: Visor cartográfico de la evolución de ocupación de Xunta de Galicia (Fuente: Xunta de Galicia).

3.6 Distribución de población

La comunidad autónoma de Galicia cuenta con un censo de 2.701.819 habitantes (Instituto Gallego de Estadística (IGE), 2020). La distribución demográfica más concentrada en las zonas costeras entre Ferrol y A Coruña en el noroeste y entre Pontevedra y Vigo en el oeste.

Comarcas	Población	Comarcas	Población
A Barcala	9950	O Condado	39894
A Coruña	384891	O Morrazo	80292
A Fonsagrada	4730	O Ribeiro	15137
A Limia	19048	O Salnés	106180
A Mariña Central	26810	O Sar	15402
A Mariña Occidental	24212	Ordes	35081
A Mariña Oriental	15383	Ortega	11379
A Paradanta	11733	Os Ancares	9348
A Ulloa	8624	Ourense	136976
Allariz-Maceda	13647	Pontevedra	120717
Arzúa	15745	Quiroga	4954
Baixa Limia	6169	Santiago	161950
Barbanza	64194	Sarria	21531

Comarcas	Población	Comarcas	Población
Bergantiños	65458	Tabeirós-Terra De Montes	23126
Betanzos	37105	Terra Chá	38358
Caldas	33111	Terra De Caldelas	2693
Chantada	12473	Terra De Celanova	16519
Deza	37904	Terra De Lemos	27992
Eume	23671	Terra De Melide	11446
Ferrol	147995	Terra De Soneira	16308
Fisterra	20884	Terra De Trives	3721
Lugo	112499	Valdeorras	23600
Meira	4879	Verín	22995
Muros	12188	Viana	5275
Noia	32185	Vigo	406654
O Baixo Miño	47997	Xallas	12931
O Carballiño	25237		

Tabla 4: Número de habitantes por comarcas (Galicia, 2020) *Fuente: Instituto Gallego de Estadística (IGE)*

Según los datos del IGE, los municipios más poblados son: Vigo, A Coruña, Santiago, Ferrol, Ourense, Pontevedra y Lugo (Tabla 4).

Generalizando los datos de la distribución de la población por comarcas, se ha creado el mapa de la densidad de la población (hab./km²) (Figura 14 y Tabla 5). Las comarcas más densas son: A Coruña, Vigo, O Morrazo, O Salnés, Barbanza, Ferrol, Santiago, Ourense y Pontevedra.

Comarcas	Densidad (hab./km ²)	Comarcas	Densidad (hab./km ²)
A Coruña	817	Ferrol	237
Vigo	667	Santiago	235
O Morrazo	573	Ourense	220
O Salnés	391	Pontevedra	194
Barbanza	262		

Tabla 5: Mayor densidad de población de las comarcas gallegas

Para planificar intervenciones civiles contra los incendios forestales es imprescindible conocer la distribución de población y tipología de vivienda. El riesgo de daños por causa de GIF para los habitantes de grandes ciudades y pueblos rodeados por bosque denso en la zona montañosa no son iguales. Las ciudades presentan una mayor protección frente a los incendios forestales gracias a su menor cobertura forestal mientras que en las zonas rurales el mayor porcentaje de incendios son provocados por la intervención humana (PLADIGA, 2017).

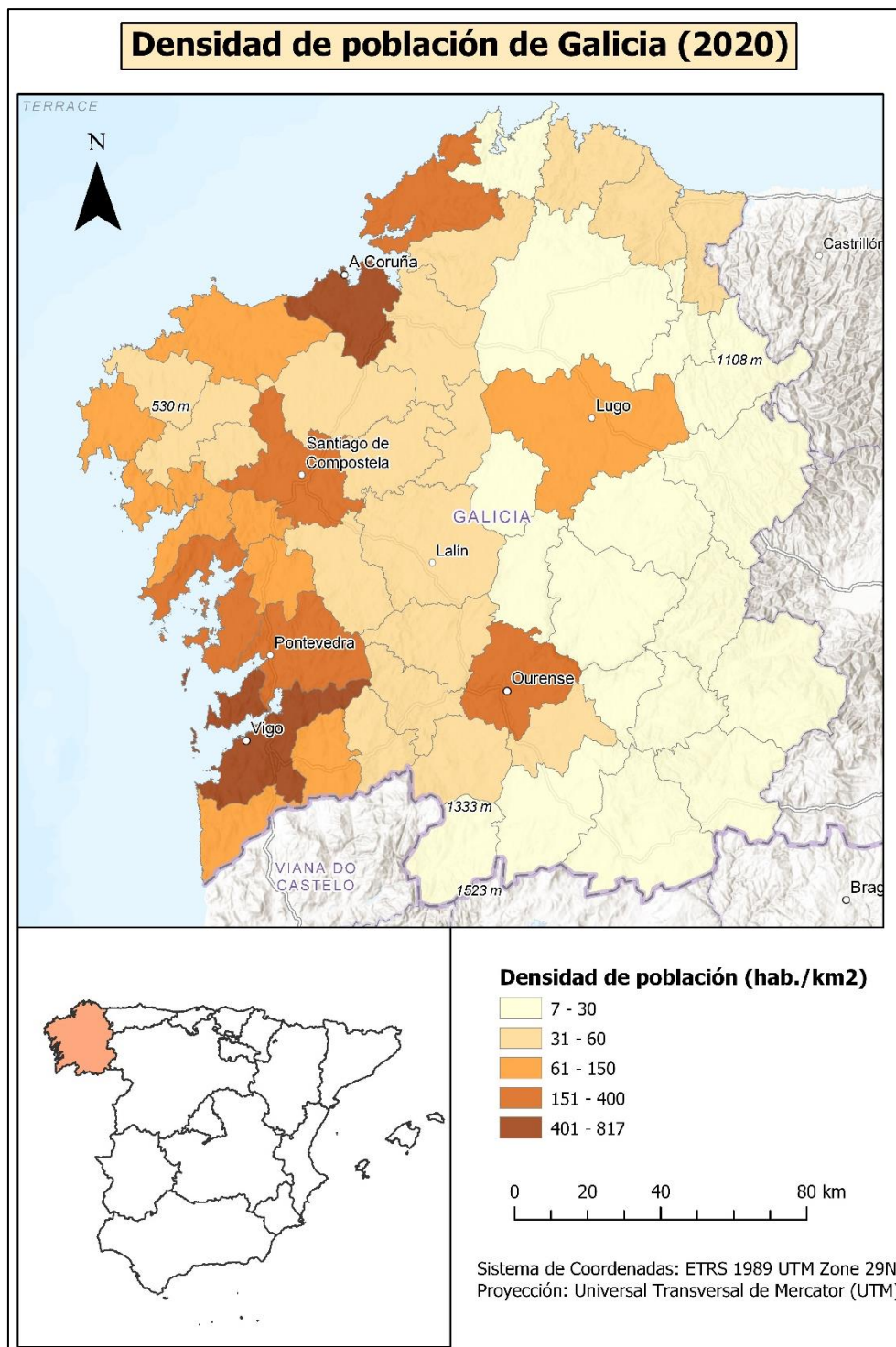


Figura 14: Densidad de población de Galicia en 2020. *Fuente: Instituto Gallego de Estadística (IGE).*

4. METODOLOGÍA Y FUENTES

En este capítulo se presentan los materiales y métodos aplicados en este trabajo necesarios para la obtención de los resultados y la consecución de los objetivos marcados. Entre estos objetivos nos interesa determinar las zonas afectadas por grandes incendios forestales (GIF) e localizar los tipos de la cobertura vegetal y de usos del suelo dañados por el fuego y la evolución de su recuperación. El primer objetivo es calcular los índices de vegetación para delimitar las zonas quemadas y posteriormente analizar la vegetación vulnerada, y por último construir el visor web a través de SIG. El planteamiento de este trabajo es describir la metodología de los cálculos para un incendio y posteriormente automatizar el proceso para los otros GIF. Los pasos que se ha descrito en este capítulo como flujo de trabajo se ha calculado para el incendio del municipio *As Neves*. Los flujos de trabajo completos se pueden observar en el *Anexo I*.

El software que se ha utilizado durante el estudio:

- **ArcMap 10.5** para determinar el área quemada, hacer los cálculos de la severidad, y localizar la cobertura vegetal y usos del suelo con SIOSE.
- **SNAP** (software libre de Copernicus) para hacer el pretratamiento de las imágenes de Sentinel y para calcular los índices.
- **Microsoft Excel 2010** para calcular las zonas quemadas en hectáreas y porcentajes de cobertura de la vegetación y de usos del suelo dañados por los GIF.
- **ArcGIS Pro** para generar mapas para representación los resultados y preparar las capas y realizar su publicación en la plataforma ArcGIS Online.
- **ArcGIS Online** para crear el visor cartográfico de las zonas afectadas por los GIF.
- **Story Map** para presentar este trabajo de manera más organizada y visual.

4.1. Fuentes utilizadas

El visor en este trabajo fue desarrollado mediante los mapas de las áreas quemadas, de la severidad de los GIF; los mapas de la cobertura vegetal y usos del suelo. Todos esos mapas se han desarrollado a través de los materiales en la Tabla 6:

INSTITUCIÓN	DATOS	FORMATO
XUNTA DE GALICIA Consellería do Medio Rural	Estadística de medioambiente de incendios	PDF (.pdf)
Instituto Gallego de Estadística (INE)	Estadística de incendios forestales por distritos forestales en Galicia	Excel (.xls)
Ministerio para la Transición Ecológica (MITECO)	Estadística de incendios forestales en España en los informes por años	PDF (.pdf)
Copernicus Open Hub	Imágenes de Sentinel-2	GeoTIFF (.tiff)
Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) del Instituto Geográfico Nacional (IGN)	Base de datos de ocupación del suelo SIOSE	SHP (.shp)
Plan Nacional de Teledetección (PNT) del IGN	Distribución de Teselas Sentinel-2	SHP (.shp)
Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG) del Instituto Geográfico Nacional (IGN)	Límite autonómico de Galicia	SHP (.shp)
Europa Press Data (EP Data)	Gráficos y tablas de evolución de los incendios por años	JPEG, PNG (.jpeg y .png)
Global Wildfire Information System (GWIS)	Mapas interactivos de incendios por años, Gráficos de evolución de incendios por años	JPEG, PNG (.jpeg y .png)

Tabla 6: Materiales utilizados

4.2 Selección y descarga de las imágenes

Para elegir correctamente las fechas de los incendios, primero, se ha analizado la evolución de los incendios en el periodo 2015-2019. En los gráficos del portal GWIS (Global Wildfire Information System) se aprecia que los incendios más importantes tuvieron lugar en 2017 (Figura 15).

De acuerdo con esta estadística el año más afectado por los GIF fue el 2017, por eso se ha elegido este año para realizar los estudios de este trabajo. Tras analizar los meses de las temporadas de incendios, cabe destacar que en 2017 hubo 4 meses muy activos (junio, agosto, septiembre y octubre).

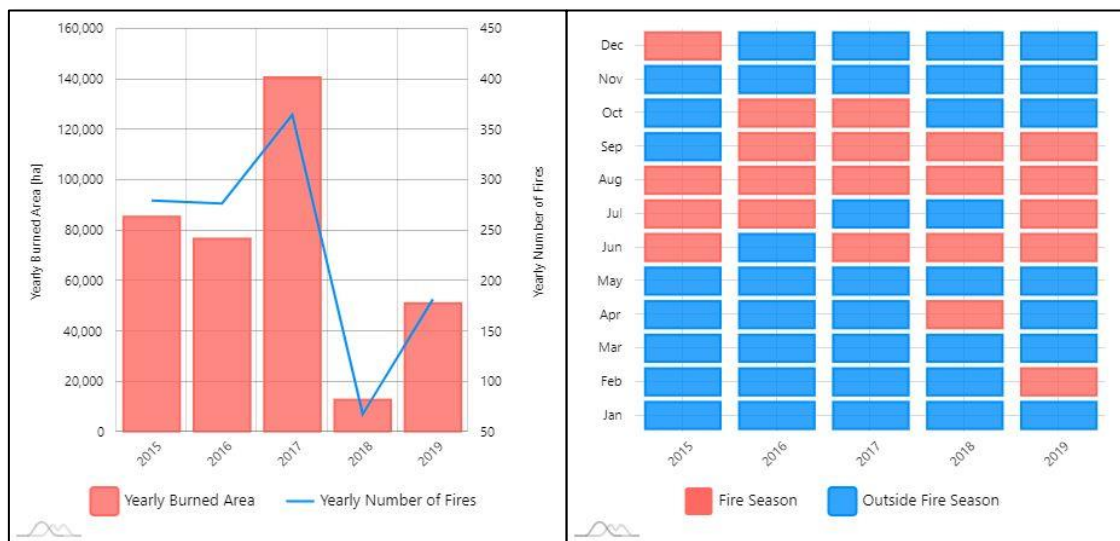


Figura 15: Gráficos con las zonas quemadas por años y por temporadas (Fuente: GWIS)

Después de hacer análisis de la evolución de los GIF y leer las noticias en los periódicos, ha de hacer el listado de los GIF, utilizando las fuentes oficiales de estadística de los incendios forestales en España de MITECO.

Análisis del incendio 2017

Caso de estudio:

03-ago – 17-oct: los GIF de 2017 afectaron a 42000 ha según la estadística general de incendios forestales.

Provincia	Municipio	Fecha	Superficie forestal (ha)	Provincia	Municipio	Fecha	Superficie forestal (ha)
Ourense	Verín	03-ago	1372,18	Ourense	Esgos	15-oct	573,03
Ourense	Lobios	09-oct	670	Ourense	Maceda	15-oct	526,36
Lugo	Cervantes	12-oct	864	Ourense	Parada de Sil	15-oct	1275,62
Lugo	Cervantes	13-oct	1785	Pontevedra	Salvaterra do Miño	15-oct	770,14
Ourense	Lobios	14-oct	3425,48	Pontevedra	Caldas de Reis	15-oct	1067,87
Pontevedra	Tui	15-oct	865,37	Pontevedra	Gondomar	15-oct	1384,92
Ourense	Chandrexa de Queixa	15-oct	741,03	Pontevedra	Nigrán	15-oct	1483,25
Ourense	Baños de Molgas	15-oct	1599,97	Pontevedra	As Neves	15-oct	2818,49
Ourense	Melón	15-oct	5965,86	Pontevedra	Ponteareas	15-oct	8877,79
				Pontevedra	Ponteareas	15-oct	645,18

Tabla 7: GIF de Galicia 2017 (Fuente: MITECO)

Este análisis nos ayuda a elegir las fechas de las imágenes adecuadas para delimitar las zonas quemadas del área de interés. Para calcular los índices de vegetación se necesitan 3 fechas distintas para cada incendio: una previa al incendio, una inmediatamente posterior y una última lo más cercana a la fecha actual para ver el nivel de la recuperación de vegetación.

En este trabajo se han analizado 5 incendios del octubre de 2017, los que tuvieron mayor cobertura del área quemada en hectáreas. Todos los GIF tuvieron lugar en la misma fecha por eso se ha elegido 3 fechas iguales para todos los incendios (Tabla 9). La lista de los incendios elegidos para el análisis se presenta en la tabla 8:

Provincia	Municipio	Fecha	Superficie forestal (ha)
Pontevedra	Ponteareas	15-oct	8877,79
Ourense	Melón	15-oct	5965,86
Ourense	Lobios	14-oct	3425,48
Pontevedra	As Neves	15-oct	2818,49
Pontevedra	Nigrán	15-oct	1483,25

Tabla 8: Litado de los GIF definitivo para el estudio y construcción el visor cartográfico.

Pre-incendio	Post-incendio	Imagen actual
03-08-2017	26- 11-2017	18-07-2020

Tabla 9: Fechas de las imágenes descargadas

Para este trabajo se han utilizado las imágenes del satélite *Sentinel-2*. Este satélite proporciona imágenes multispectrales para monitorización de la Tierra y provisión de información para servicios de emergencia, entre ellos, los relativos a incendios forestales. Dichas imágenes tienen resolución espacial de 10, 20 y 60m y consisten en datos de 13 bandas (Tabla 10) en el espectro visible, en el infrarrojo cercano (NIR) y en el infrarrojo de onda corta (SWIR). Misión satelital Sentinel-2 cuenta con 2 satélites: Sentinel-2A (S2A) que fue lanzado en 23 de junio de 2015 y Sentinel-2B (S2B) que fue lanzado en 7 de marzo de 2017.

Número de banda	S2A		S2B		Resolución espacial (m)
	La longitud de onda central(nm)	Ancho de banda (nm)	La longitud de onda central (nm)	Ancho de banda (nm)	
1 – Coastal aerosol	442.7	21	442.3	21	60
2 Blue	492.4	66	492.1	66	10
3 Green	559.8	36	559.0	36	10
4 Red	664.6	31	665.0	31	10
5 Vegetation red edge	704.1	15	703.8	16	20
6 Vegetation red edge	740.5	15	739.1	15	20
7 Vegetation red edge	782.8	20	779.7	20	20
8 NIR	832.8	106	833.0	106	10
8ª Narrow NIR	864.7	21	864.0	22	20
9 Water vapour	945.1	20	943.2	21	60
10 SWIR – Cirrus	1373.5	31	1376.9	30	60
11 SWIR	1613.7	91	1610.4	94	20
12 SWIR	2202.4	175	2185.7	185	20

Tabla 10: Bandas espectrales para el satélite Sentinel-2 (sensores S2A y S2B) *Fuente:* *MultiSpectral Instrument (MSI) Overview*". *Sentinel Online. European Space Agency. Retrieved 3 December-2018.*

Para descargar las imágenes se ha utilizado el portal abierto *Copernicus Open Access Hu*

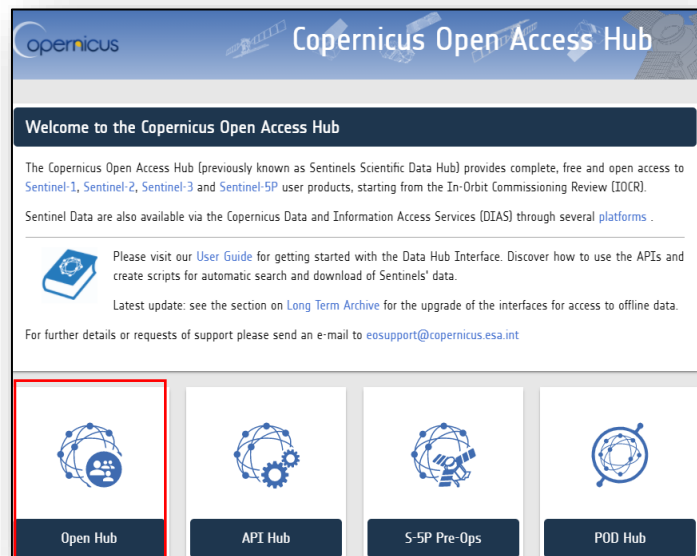


Figura 16: Página principal del Copernicus Hub (*Fuente: <https://scihub.copernicus.eu/>*)

Según el listado de la tabla 7 se aprecia 3 provincias afectadas por los GIF (Lugo, Ourense y Pontevedra).

Se ha elegido la zona de estudio de esas tres provincias y se han descargado las imágenes necesarias para 3 fechas según la tabla 9.

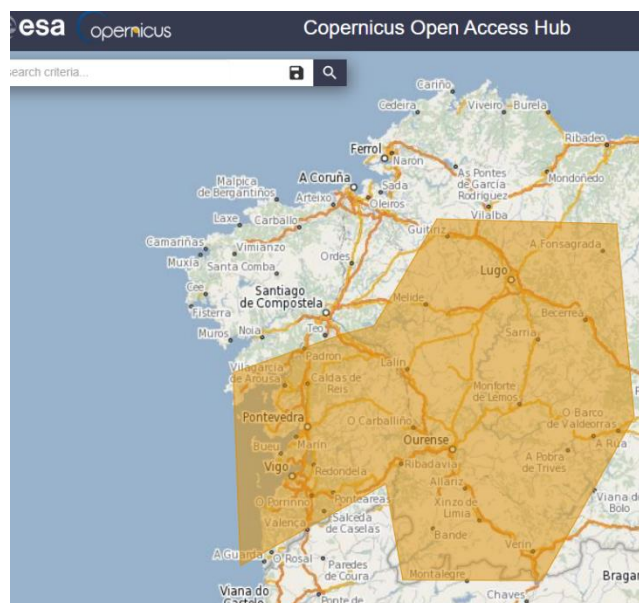


Figura 17: Descarga de las imágenes de la zona de interés (*Fuente: <https://scihub.copernicus.eu/>*)

Para facilitar la elección de las imágenes correctas según la zona, se ha usado el esquema de las teselas de Sentinel-2 como referencia (Figura 18). La zona interesada cabe dentro de 4 teselas: 29TNH, 29TPH, 29TNG, 29TPG.

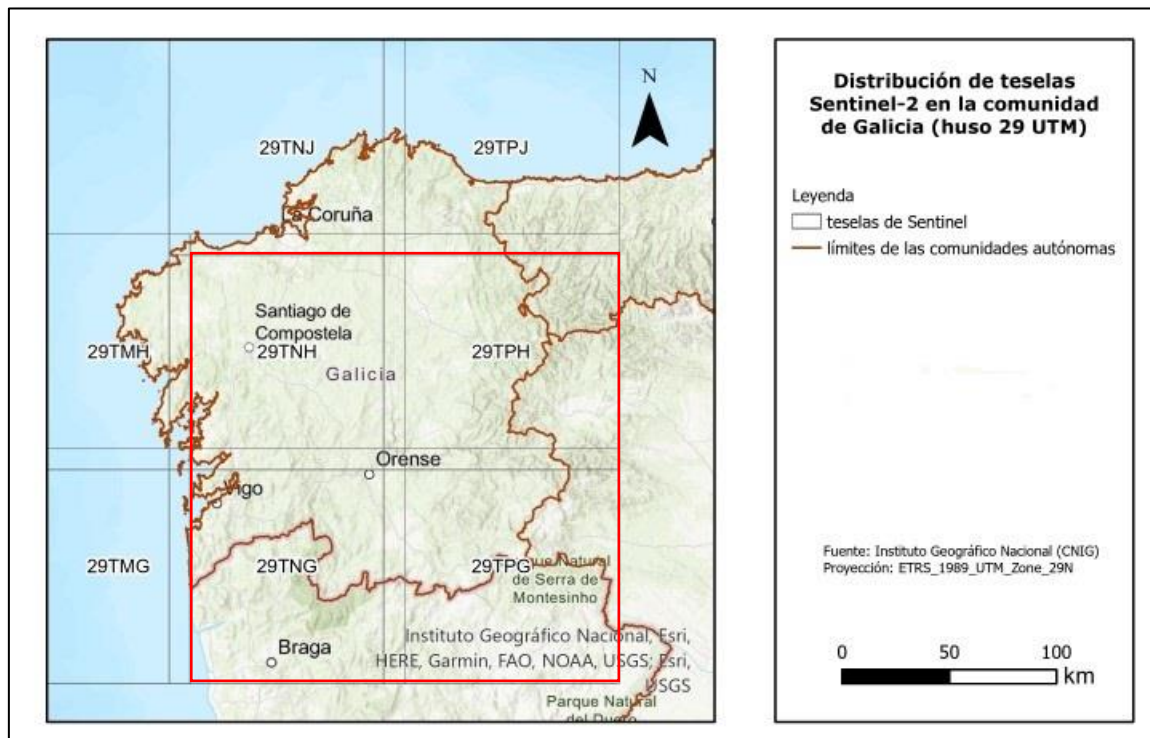


Figura 18: Distribución de las teselas Sentinel-2 en la comunidad de Galicia. *Fuente: CNIG con elaboración propia en ArcGIS Pro.*

Después de haber obtenido la Figura 18 se ha hecho un listado de los GIF de 2017 incluyendo las teselas para cada incendio.

Provincia	Municipio	Tesela
Pontevedra	Ponteareas	TNG
Ourense	Melón	TNG
Ourense	Lobios	TNG
Pontevedra	As Neves	TNG
Pontevedra	Nigrán	TNG

Tabla 11: Distribución de las teselas por municipios

Para convertir el archivo .shp (Figura 18) al .kmz. se ha utilizado la herramienta “*Layer to KML*” (Figura 19). Para localizar el municipio según las teselas posteriormente se abre el archivo de resultado en Google Earth (Figura 20).

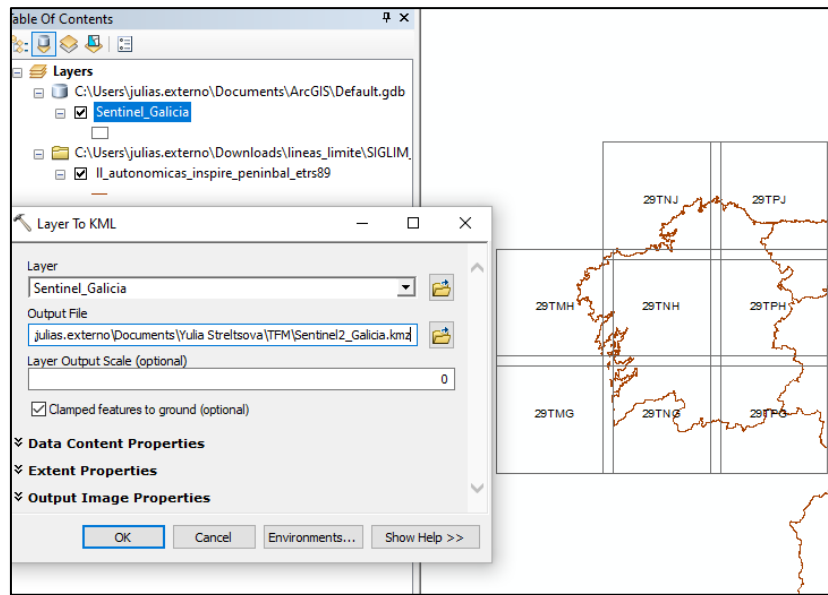


Figura 19: Herramienta *Layer to KML* en ArcMap

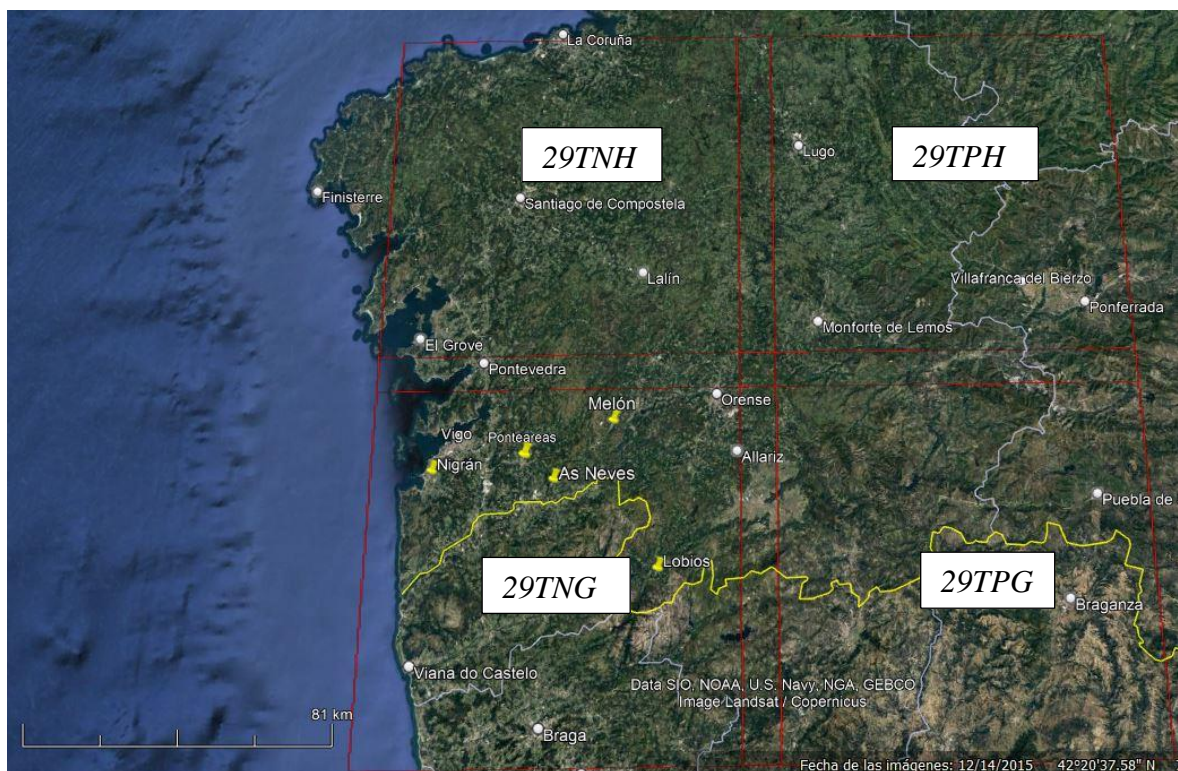


Figura 20: Visualización de las teselas en Google Earth con los incendios de interés

Corrección atmosférica y selección del producto

Misión Sentinel-2 ofrece 2 tipos de productos para usuarios que se aprecian en la tabla 12:

Nombre	Descripción	Generación y distribución	Volumen de datos
Nivel 1C	Reflectancia TOA en geometría cartográfica	Sistemáticamente y online	600MB (cada 100x100 km ²)
Nivel 2A	Reflectancia BOA en geometría cartográfica	Online y por usuario a través de Sentinel-2 Toolbox	800MB (cada 100x100 km ²)

Tabla 12: Productos disponibles de Sentinel-2 (Fuente:

<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/product-types>)

Uno de los inconvenientes del trabajo con imágenes de teledetección para el análisis cuantitativo es la necesidad de realizar una corrección atmosférica. Dicho preprocesamiento es uno de los pasos más importantes para obtener resultados correctos. Es imprescindible transformar radiancia espectral (el valor que mide un satélite) a reflectancia de la superficie según la recomendación de la guía para usuarios de la ESA (The European Space Agency) (*ESA, User Guides*).

Lo primero que hace un satélite de Sentinel-2 es la transformación directa desde radiancia a reflectancia TOA (“Top of atmosphere” nivel 1C, Tabla 12) que significa reflectancia en el techo de la atmósfera para superficie plana. Las imágenes del producto del nivel 2A con la reflectancia BOA (“Bottom of atmosphere”) que es la reflectancia a nivel de superficie, no se generan automáticamente. Por eso es necesario hacer correcciones atmosféricas usando la herramienta especial (*ESA, User Guides*), lo cuyo uso se describe en la parte de pretratamiento de las imágenes.

Para Europa el producto del nivel 2A genera las imágenes sistemáticamente a partir de marzo de 2018 así que para el año 2020 se han descargado las imágenes del nivel 2A con correcciones incluidas. Para el año de 2017 se ha descargado las imágenes del nivel 1C.

4.3 Pretratamiento de las imágenes

a) Correcciones atmosféricas y el uso de *Graph Builder* en SNAP

Una vez que se han descargado las imágenes se realiza un pretratamiento usando la herramienta SNAP, un software libre para trabajar con imágenes satelitales de Sentinel. Este software permite crear rasters menos pesados para posteriormente trabajar con ellos en SIG. Lo destacado es que SNAP nos ayuda a reducir el tamaño del archivo conservando solo las bandas necesarias para el análisis.

Lo primero que hay que hacer es la corrección atmosférica para las imágenes descargadas del nivel 1C. De acuerdo con Chuvieco (2004) los cálculos de los índices hay que hacer con la reflectancia BOA. Dicha corrección se ha hecho con el plugin *Sen2Cor* (v2.8.0).

Esta herramienta ha sido desarrollada específicamente para hacer las correcciones atmosféricas para el programa SNAP, cuyo objetivo es corregir imágenes de nivel 1C (TOA) a fin de obtener imágenes de nivel 2A (BOA) (Rumora, 2020).

Desde el menú se accede a este plugin con la siguiente ruta: *Optical->Thematic Land Processing->Sen2Cor* (Figura 21).

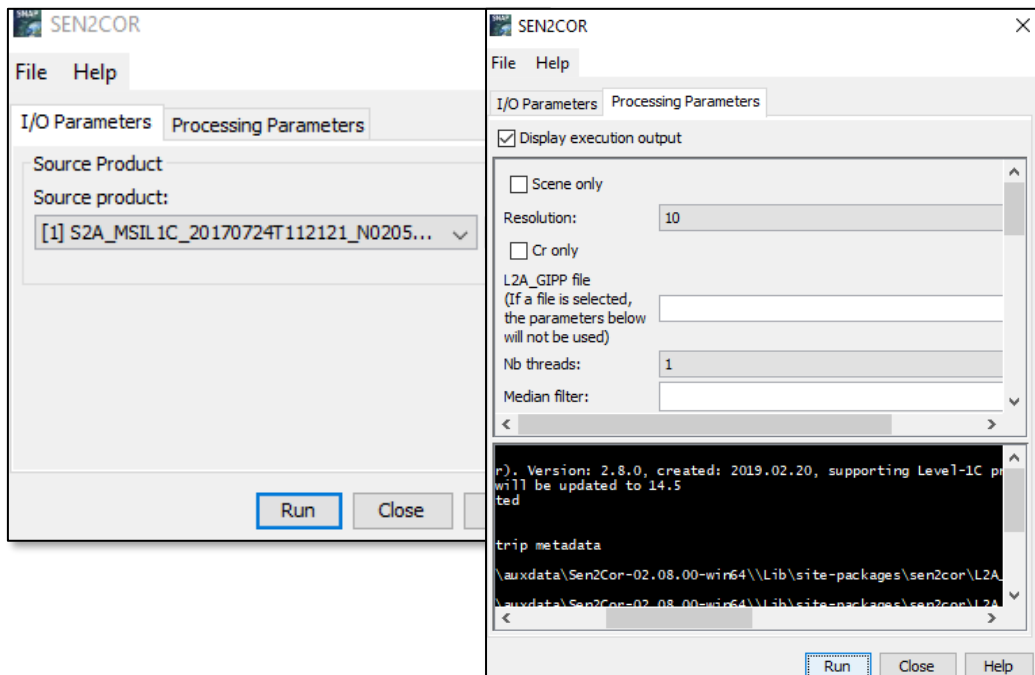


Figura 21: Uso de la herramienta Sen2Cor y su interfaz (SNAP software)

Después de haber mejorado las imágenes con la corrección atmosférica se ha recurrido a 2 herramientas: *Subset* y *Resample*. Primera herramienta permite elegir las 5 bandas más utilizadas para composiciones y cálculos de índices de vegetación. Segunda herramienta permite establecer el mismo valor de resolución espacial para todas las imágenes.

Si se usa el mismo flujo para varias imágenes es adecuado utilizar la herramienta *Graph Builder* para automatizar el proceso de pretratamiento de las imágenes, como se muestra en la Figura 22.

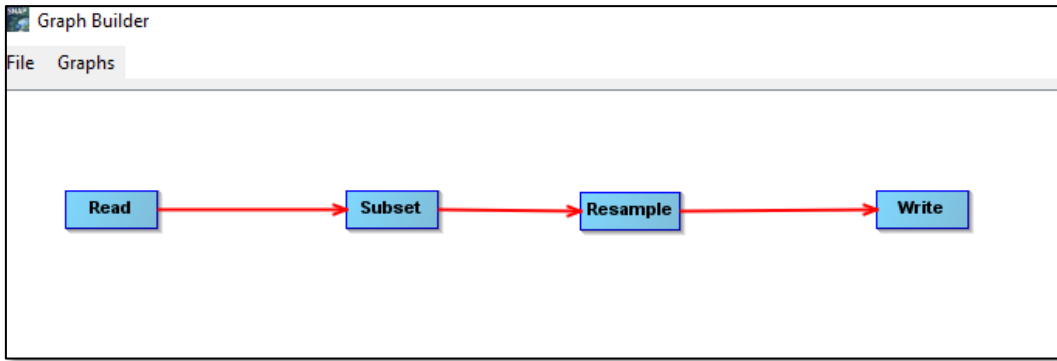


Figura 22: Esquema de la herramienta Graph Builder dentro de SNAP

En la pestaña *Subset* – se indican las 5 bandas de interés: bandas del espectro visible (banda 2 (azul), banda 3 (verde), banda 4 (rojo), banda 8 (infrarrojo cercano) y banda 11 (infrarrojo de onda corta)). La pestaña de procesamiento *Resample* presenta dos parámetros: uno de resolución de pixel que se fija a 10 metros y otro de método de resampling, seleccionado a *Bicubic*, dado que es el más preciso. En la pestaña *Write* se incluye el nombre del archivo de salida y su ruta (Figura 23).

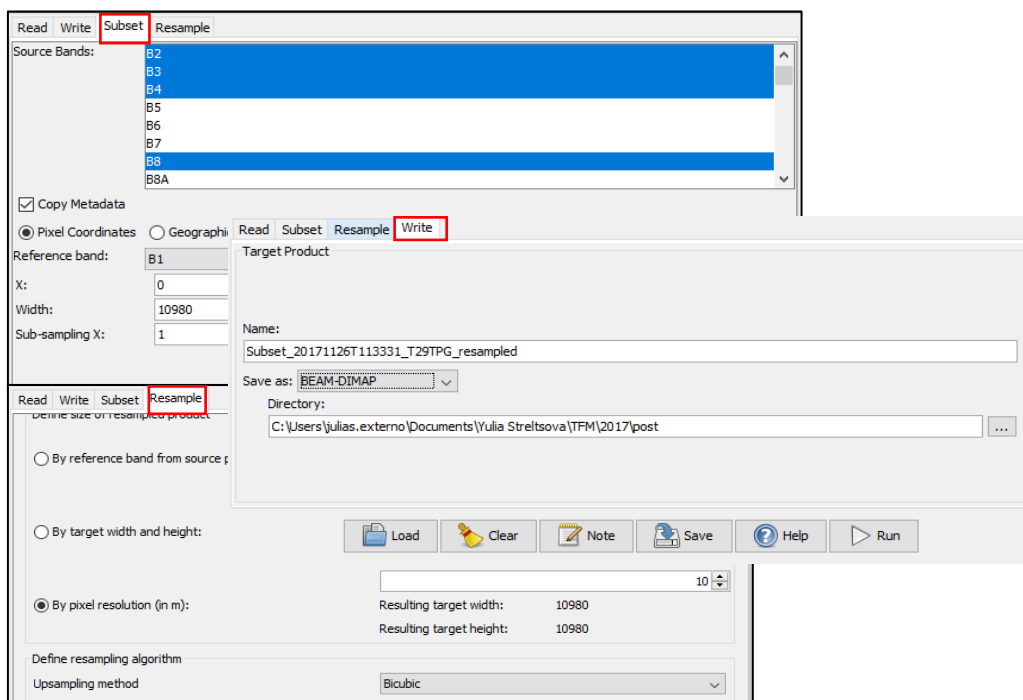


Figura 23: Procesamiento de la imagen dentro de Graph Builder

b) Cálculos de los índices espectrales en SNAP

Para delimitar las superficies afectadas por los GIF lo primero que se debe realizar es el cálculo de los índices, los cuales se pueden obtener mediante diferentes métodos y utilizando distintas herramientas. En este trabajo se han calculado los índices a través de la aplicación *SNAP*.

El índice más utilizado para análisis de vegetación es *el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)* que fue desarrollado en 1970 (Rouse et al., 1973) y se calcula con la siguiente formula:

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{Rojo}}{\text{NIR} + \text{Rojo}}$$

Ecuación 7: Fórmula para calcular el NDVI

Se calcula la diferencia y suma de las bandas infrarrojo cercano y rojo y se divide entre si. En SNAP se ha utilizado la herramienta de *NDVI Processor* para calcular el índice de todas imágenes descargadas (Figura 24).

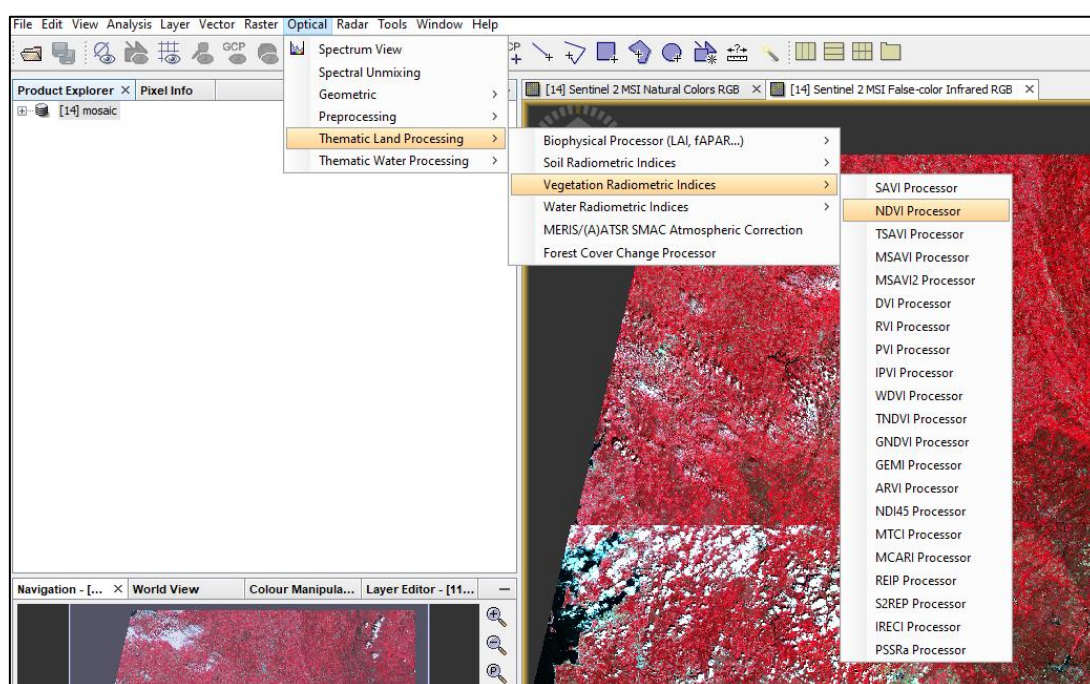


Figura 24: Ejemplo del cálculo del NDVI en SNAP

En primer lugar, se ha calculado el NDVI antes del incendio y posteriormente el NDVI después del incendio utilizando las imágenes previamente descargadas y atmosféricamente corregidas.

El siguiente índice que se ha calculado en SNAP es el NBR (**Normalized Burn Ratio**) o el índice normalizado de quema. Se utilizan las bandas NIR y SWIR para destacar las áreas incendiadas a la vez que debilita las diferencias en la iluminación y los efectos atmosféricos (Chuvieco, 1996 y 1999).

El NBR se calcula con la siguiente formula que representa la diferencia y suma de infrarrojo cercano e infrarrojo de onda corta divididas entre si (Hunt y Rock, 1989):

$$\text{NBR} = \frac{\text{NIR} - \text{SWIR}}{\text{NIR} + \text{SWIR}}$$

Ecuación 8: Fórmula para calcular el NBR

Este índice se ha calculado en SNAP sobre la imagen post-incendio, con la herramienta *Band Maths* (Figura 25), utilizando la siguiente expresión: $(\text{B8}-\text{B11}) / (\text{B8}+\text{B11})$, donde la banda 8 es el infrarrojo cercano y banda 11 es el infrarrojo de onda corta.

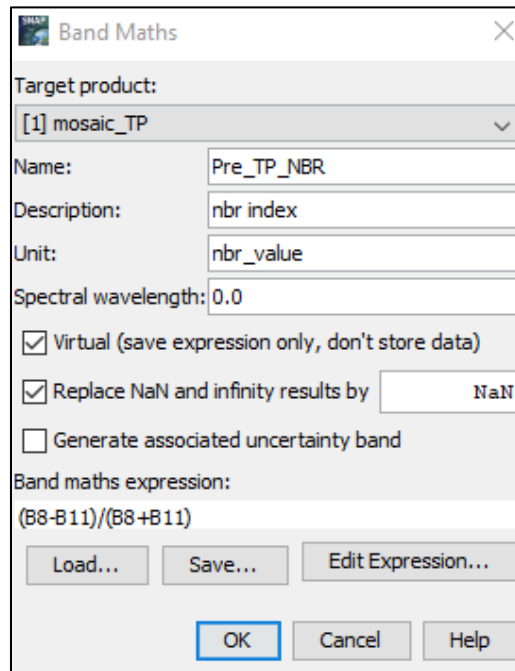


Figura 25: Ventana de diálogo de un de los cálculos del NBR realizados en este trabajo en SNAP

Se calcula dos índices diferentes para comparar los valores de las áreas quemadas y posteriormente elegir el mejor índice para determinar el área.

4.4 Estimación de superficies afectadas por la quema mediante varios índices espectrales

En el siguiente parte de la metodología se describe como se determina el área quemada. Todos los próximos pasos se ha hecho en ArcMap. En primer lugar, localizamos el incendio en Google Earth y creamos AOI (Area of Interés) dentro de nueva Geodatabase: *New->File Geodatabase->New Feature Class* (Figura 26).

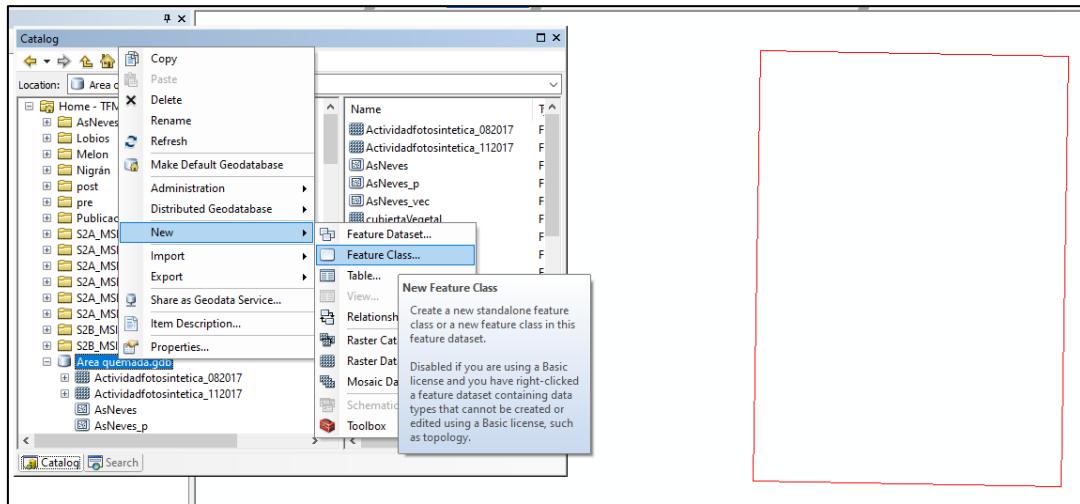


Figura 26: Recorte de AOI para el análisis del área quemada en ArcMap

En el segundo lugar, se abren las imágenes de los índices calculados en SNAP en la parte anterior y se aplica la herramienta *Clip* para recortar los rasters de los índices para el área de estudios.

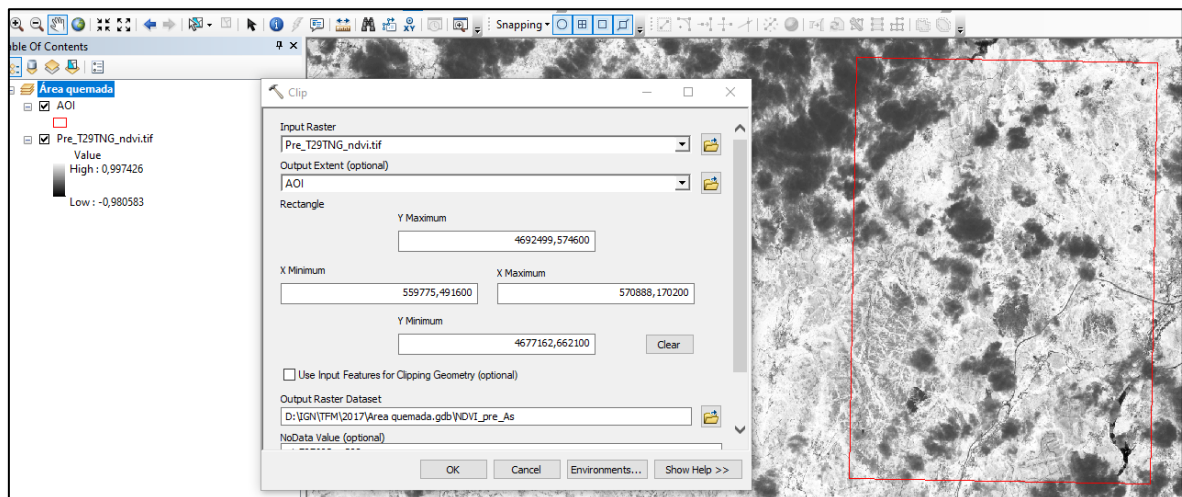


Figura 27: Recorte del área quemada con la herramienta Clip

En el tercer lugar, una vez obtienen los rasters cortados por AOI, se las reclasifican según los criterios para la zonificación de la cubierta vegetal propuestos por Chuvieco, 2015 (Tabla 13). La reclasificación se hace sobre el raster de NDVI pre-incendio:

Rangos de NDVI	
< 0	Presencia de agua y/o áreas con sombra
0 - 0,2	Suelo desnudo
0,2 - 0,4	Vegetación escasa + Suelo
0,4 - 0,6	Vegetación dispersa
> 0,6	Vegetación densa

Tabla 13: Criterios para la zonificación de la cubierta vegetal mediante los valores de NDVI. Fuente: Chuvieco, 2015

El resultado de la reclasificación del índice se ha conseguido usando la herramienta *Reclassify*. El mayor porcentaje de la cobertura se da con la vegetación densa (Figura 28).

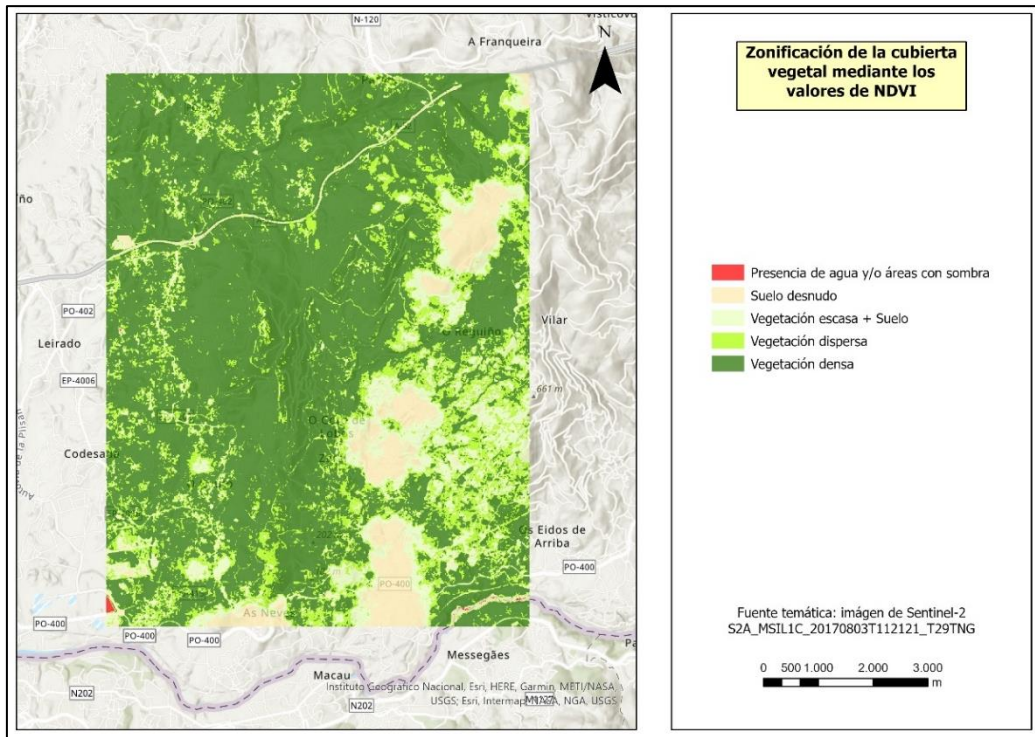


Figura 28: Ejemplo de zonificación de la cubierta vegetal mediante los valores de NDVI

En cuarto lugar, se delimita la zona de GIF. Para este proceso se ha utilizado el cálculo de la diferencia de las dos imágenes de NDVI después de incendio y antes de incendio usando la herramienta *Raster Calculator* (Figura 29) con la fórmula:

$$dNDVI = NDVI_{post} - NDVI_{pre}$$

Ecuación 9: Fórmula para calcular la diferencia de NDVI

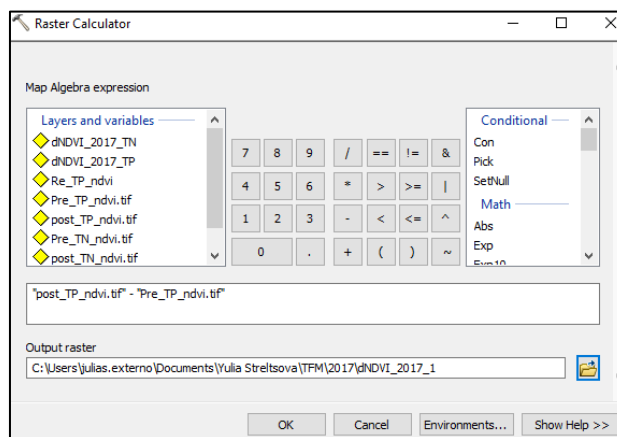


Figura 29: Herramienta *Raster Calculator* para hacer los cálculos de la diferencia de los índices NDVI.

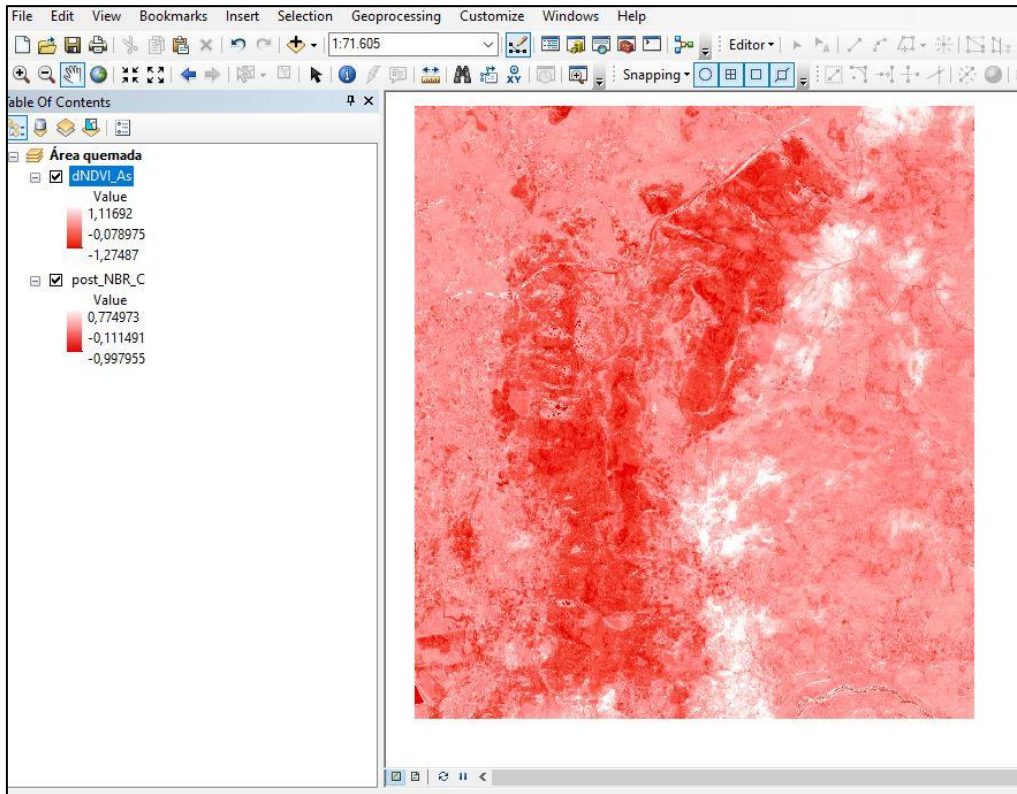


Figura 30: Ejemplo del resultado del cálculo dNDVI

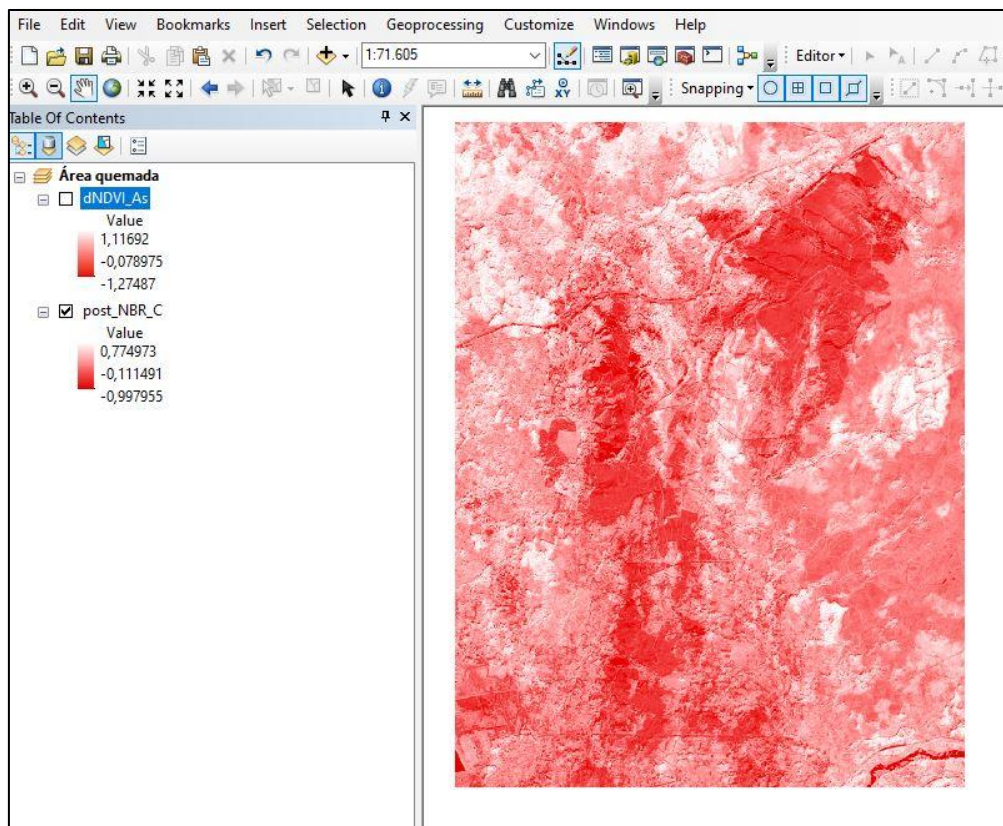


Figura 31: Ejemplo de la imagen NBR post incendio recortado

Como se había dicho en el capítulo 2 que el NBR post incendio también se utiliza para delimitar la zona. En las Figuras 30 y 31 se comparan los valores de dNDVI y NBR después del incendio. Se puede observar que los valores son similares. Por esta razón es necesario elegir el mejor índice.

4.5 Delimitación del área quemada

Una vez obtenidos los índices NDVI y NBR, ambos resultados se combinan para seleccionar los píxeles quemados que representen un valor mínimo en cada índice. Dichos umbrales fueron establecidos según el criterio de Bastarrika et al. (2011), cuyo concepto se ha escrito en el capítulo 2.

Índice	Valor umbral
dNDVI	< -0.17767
NBR post	< -0.15006

Tabla 14: Valores umbral para los índices según el criterio de Bastarrika et al. (2011)

Se puede ver en la Figura 32 el resultado de la segmentación y delimitación del área quemada usando los valores umbral de la tabla 14.

Para validar la segmentación se ha calculado el índice M que indica la separabilidad espectral.

El indicador que cuantifica la eficacia por la que cada índice separa las superficies dañadas de las zonas no afectadas por incendio ha sido desarrollado por Pereira (1999) y se calcula como la diferencia normalizada según la siguiente fórmula:

$$M = \frac{|\mu_{\text{quemado}} - \mu_{\text{Noquemado}}|}{\sigma_{\text{quemado}} + \sigma_{\text{Noquemado}}}$$

Ecuación 10: Fórmula para calcular el índice M

donde μ_{quemado} es la media de los píxeles de las cubiertas quemadas;

$\mu_{\text{Noquemado}}$ es la media de los píxeles de las cubiertas no quemadas;

σ_{quemado} es la desviación típica de los píxeles de las cubiertas quemadas;

$\sigma_{\text{Noquemado}}$ es la desviación típica de los píxeles de las cubiertas no quemadas.

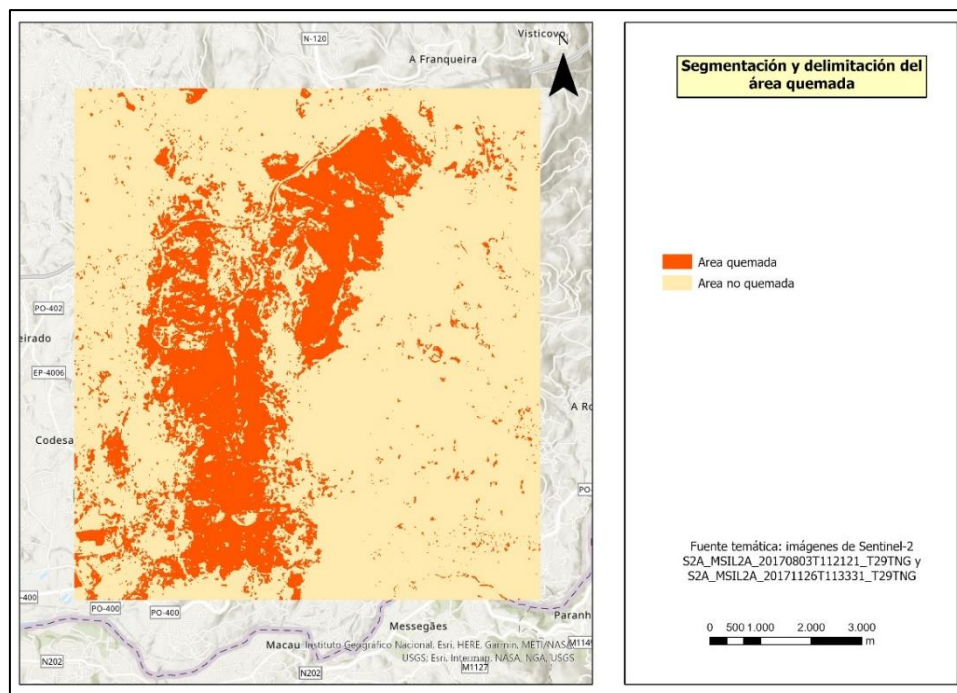


Figura 32: Ejemplo de segmentación y delimitación del área quemada

Los valores de M mayores de 1 indican una buena separabilidad, mientras que los valores menores de 1 representan una importante superposición de los histogramas de las dos clases de las que se trate. Cuanto mayor es el valor M, mejor segmentada está la imagen (Oliva, 2008).

El resultado del cálculo de dicho valor va a influir en la selección del índice para este trabajo.

Para calcular las medias de los píxeles y las desviaciones típicas se ha utilizado la herramienta *Zonal Statistics as Table*, como se muestra en la figura 33 y en la figura 34:

dNDVI_TP_stat										
Rowid	VALUE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	
1	1	88690599	8869059900	-1,307457	-0,17767	1,129787	-0,385167	0,166383	-34160705,945558	
2	2	166952833	16695283300	-0,17767	1,324985	1,502655	0,001244	0,101783	207660,649162	

Figura 33: Resultado de la estadística de los píxeles de la imagen con el NDVI

NBR_tp_stat										
Rowid	VALUE	COUNT	AREA	MIN	MAX	RANGE	MEAN	STD	SUM	
1	1	21455268	2145526800	-0,999286	-0,15006	0,849226	-0,224965	0,064609	-4826674,887938	
2	2	208861211	20886121100	-0,15006	0,988304	1,138364	0,144026	0,182255	30081344,864347	

Figura 34: Resultado de la estadística de los píxeles de la imagen con el NBR

Una vez se tienen las variables identificadas, se calcula el valor M para cada índice a través de Excel. El resultado final se muestra en la tabla 15:

INDICE	Categoría	Media	Desviación típica	Valor M
dNDVI	No quemado	0,001244	0,101783	1,44093957
	Quemado	-0,385167	0,166383	
NBR post	No quemado	0,144026	0,182255	<u>1,49471369</u>
	Quemado	-0,224965	0,064609	

Tabla 15: Resultado de cálculo del valor M

Según los resultados obtenidos, se aprecia que el valor M es similar en ambos casos. Se decide elegir el índice NDVI dado que las imágenes con este índice se representan mejor visualmente.

El siguiente paso consiste en vectorizar el raster para utilizar recursos menos pesados y más manejables con el fin de validar y comparar las zonas afectadas a través de SIG con los datos oficiales. Para hacerlo se ha utilizado la herramienta *Majority Filter* para filtrar y eliminar los píxeles aislados y el ruido, posteriormente se aplica *Raster to Polygon* -> *To KML*.

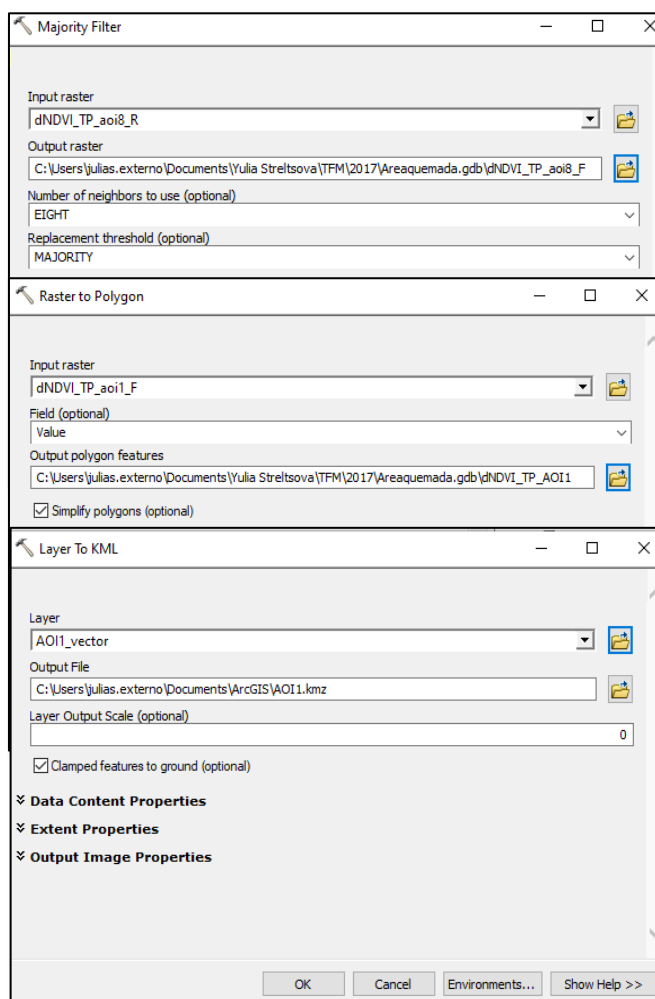


Figura 35: Herramientas utilizadas en ArcMap para vectorizar la zona afectada por GIF.

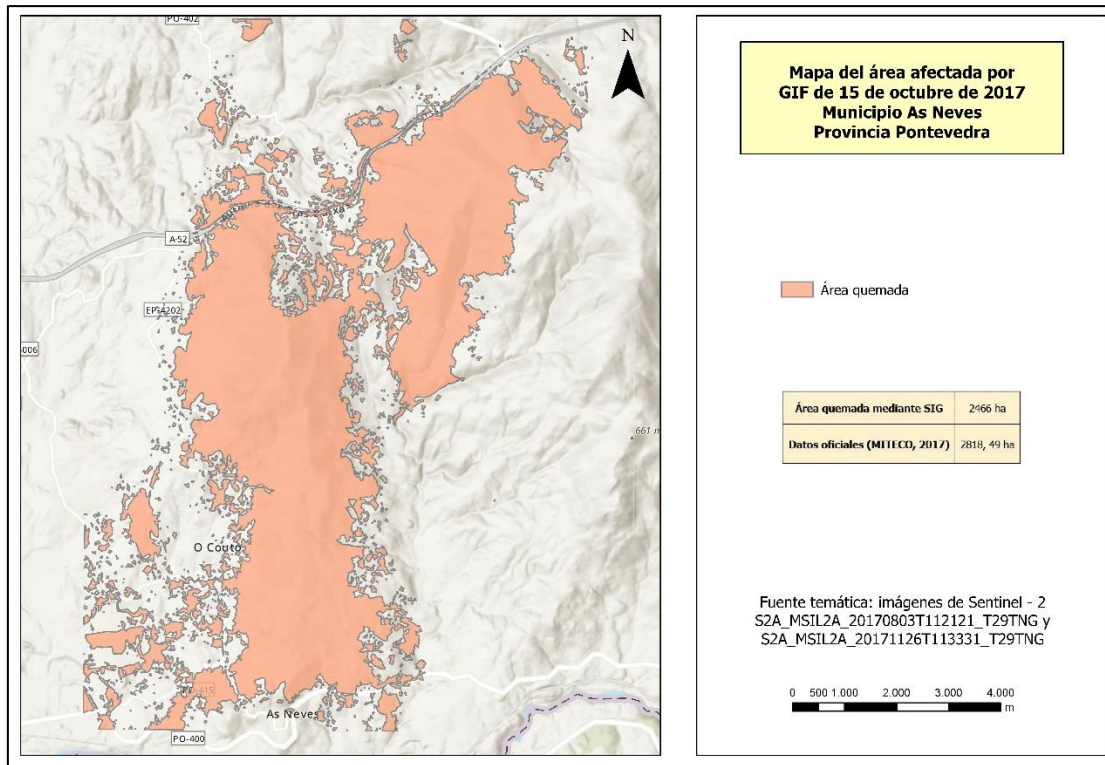


Figura 36: Ejemplo del mapa final de área afectada por GIF (el municipio As Neves)

Después de obtener el archivo .shp del área quemada, se lo ha convertido en el formato .kmz y se ha visualizado en Google Earth (Figura 37).

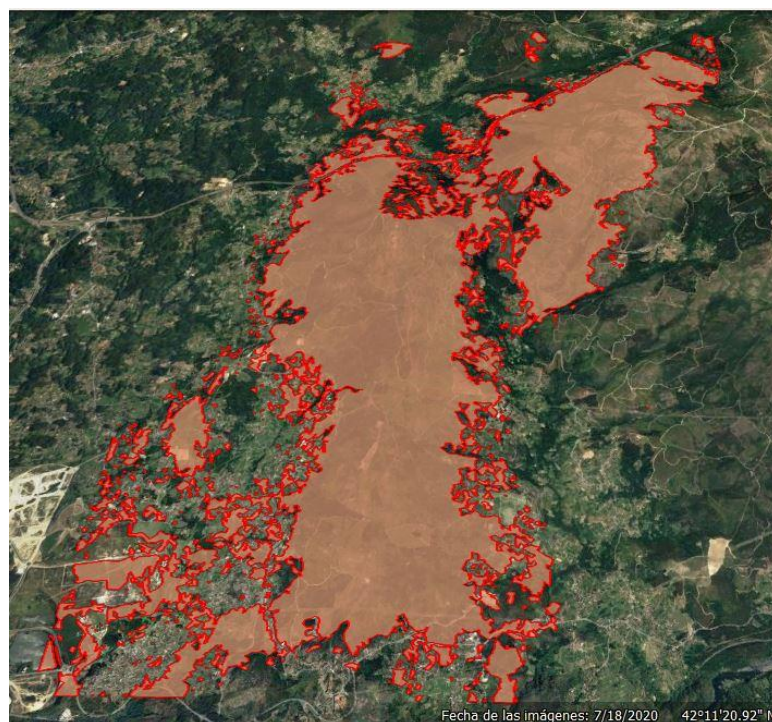


Figura 37: Ejemplo de la vectorización del área quemada en Google Earth.

4.6. Determinación de la severidad de los incendios

El término severidad se entiende como un componente crítico para evaluar la dinámica de la superficie dañada por un incendio. La severidad está muy relacionada con el proceso de recuperación de la vegetación afectada después del incendio. Por otro lado, se define muy a menudo como la mortalidad de la vegetación (Montorio, 2014).

El análisis de severidad nos permite evaluar el grado de alteración y perturbación del suelo afectado por un incendio. Además, gracias a este método se puede pronosticar la recuperación de la vegetación como siguiente paso.

Los valores del NBR varían entre -1 y 1. Valores negativos representan las zonas afectadas por el incendio. Valores positivos representan las zonas vegetales sanas o en fase de regeneración, si previamente ha existido un incendio.

El cálculo del índice espectral de severidad consiste en la determinación de la dNBR, desarrollada por Key y Benson (2005), la cual se ha calculado a través de la diferencia entre el índice NBR previo y posterior al incendio:

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

Ecuación 11: Fórmula para calcular la diferencia de NBR

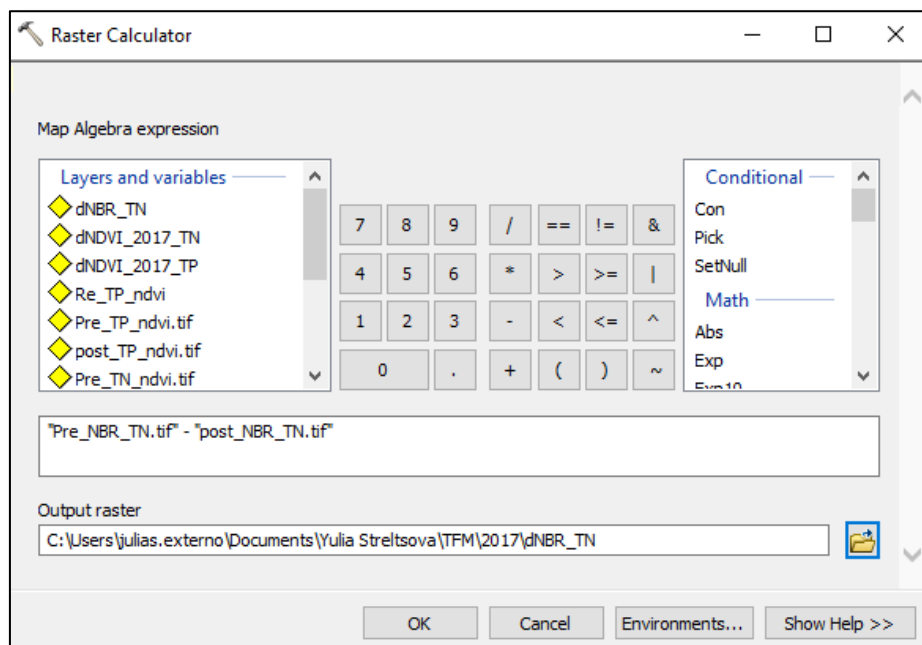


Figura 38: Cálculo de la diferencia de NBR (dNBR) en ArcMap

Con el cálculo de dNBR se ha clasificado, a través de la herramienta *Reclassify* (Figura 39), de acuerdo al estándar del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), (Key y Benson, 2006) (Tabla 16).

<i>dNBR</i>	<i>Grado de severidad</i>
< - 0,25	Alto crecimiento de vegetación post incendio
- 0,25 – -0,1	Bajo crecimiento de vegetación post incendio
-0,1 – 0,1	Zonas estables o sin quemar
0,1 – 0,27	Severidad del incendio baja
0,27 – 0,44	Severidad del incendio moderada-baja
0,44 – 0,66	Severidad del incendio moderada-alta
> 0,66	Severidad del incendio alta

Tabla 16: Clasificación de USGS para analizar la severidad de GIF. (Fuente: Key y Benson, 2006)

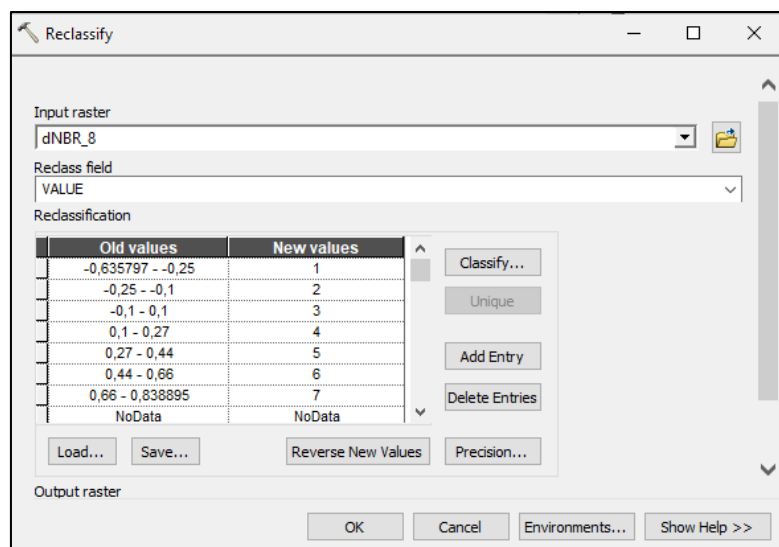


Figura 39: Ejemplo del empleo de la herramienta *Reclassify* para establecer los rangos de severidad del incendio

Como segunda alternativa para evaluar la severidad post-incendio, se utiliza el NDVI para la estimación de la cantidad de biomasa verde y alta relación existente entre la severidad del fuego y cantidad de vegetación consumida (De Santis y Chuvieco, 2007). El NDVI permite estimar la actividad fotosintética de la vegetación.

Los valores del NDVI varían entre -1.0 y 1.0. Este índice de vegetación permite clasificar la existencia o ausencia de hojas verdes en la superficie: valores bajos muestran baja actividad fotosintética o ausencia de hojas verdes; valores altos indican alta actividad fotosintética y alta probabilidad de existencia de hojas verdes.

La clasificación del NDVI por rangos según la actividad fotosintética fue propuesta por Duncan et al. en 1993. El resultado de agrupación por las clases se aprecia en la Tabla 17 (Duncan et al, 1993)

Actividad fotosintética	Rango
Nula	< 0
Muy baja	0 - 0,1
Baja	0,1 - 0,2
Media	0,2 - 0,3
Media-alta	0,3 - 0,4
Alta	0,4 - 0,6
Muy alta	> 0,6

Tabla 17: Rangos de actividad fotosintética (Fuente: Duncan et al., 1993)

Para visualizar la actividad fotosintética se ha reclasificado las imágenes del NDVI pre-incendio y el NDVI post-incendio, utilizando la herramienta *Reclassify*.

4.7. Determinación de afección de los distintos usos (SIOSE) y de las cubiertas vegetales

Uno de los objetivos principales fue determinar la cobertura del área quemada según el tipo de ocupación del suelo y la vegetación. Para cumplir este objetivo se ha empleado la cartografía temática de ocupación del suelo de SIOSE (base de datos de ocupación del suelo en España) del año 2014.

Los datos fueron descargados a través de la página CNIG (Centro de descargas IGN), Figura 40.



Figura 40: Descarga el base de datos SIOSE de 2014 (Fuente: CNIG)

Una vez se ha descargado el mapa del uso del suelo y la cobertura vegetal, se ha recortado por el área quemada utilizando la herramienta *Clip*:

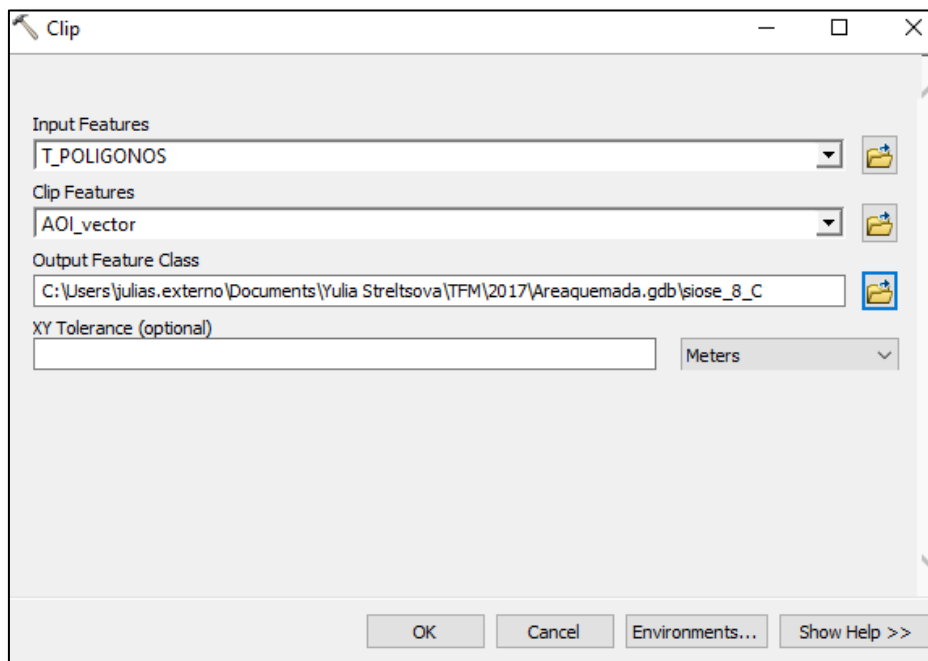


Figura 41: Recorte SIOSE por el área quemada (*Herramienta Clip*)

4.8. Grado de recuperación

Uno de los objetivos específicos es el análisis de la recuperación de la vegetación afectada por GIF desde la ocurrencia del incendio hasta el año 2020. En cada caso de estudio se selecciona una imagen de 2020 que coincida con el mes en el que se produjo el incendio para cada caso. En el caso que se ha elegido un ejemplo, el incendio se produjo en 15 de octubre de 2017 y se utilizó la imagen de 18 de julio de 2020 por la mejor resolución y ausencia de nubes.

Se han descargado los rasters del 2020 desde la página de *Copernicus Hub* según el apartado 4.2 de la metodología y se ha hecho el procesamiento para la preparación de las imágenes según el apartado 4.3 (ver ANEXO I: Flujo de trabajo).

El siguiente paso que falta para observar la recuperación de la vegetación es crear la cartografía de severidad del incendio de 2020 para la imagen de la fecha de 2020.

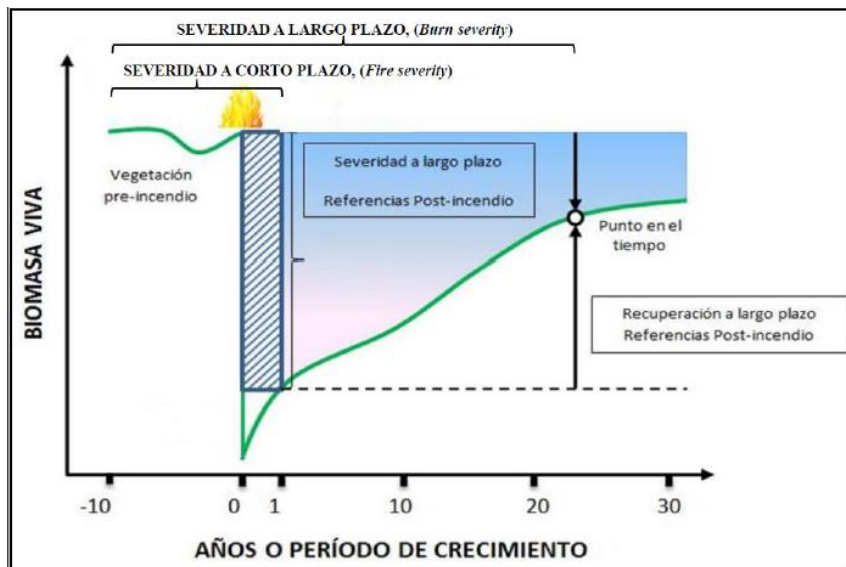


Figura 42: Evaluación de severidad basada en los estudios de Key y Benson (2006)

La severidad de los incendios y el grado de recuperación están muy relacionados. El análisis de la severidad permite establecer las superficies con la pérdida de vegetación más elevada. Si hablamos de recuperación en función de los años, debemos tener en cuenta la severidad a largo plazo. En la figura 43 se aprecia regeneración vegetal con años. Por eso para el análisis de la recuperación de la vegetación dañada es necesario analizar la imagen de la fecha más actual posible (Key y Benson, 2006).

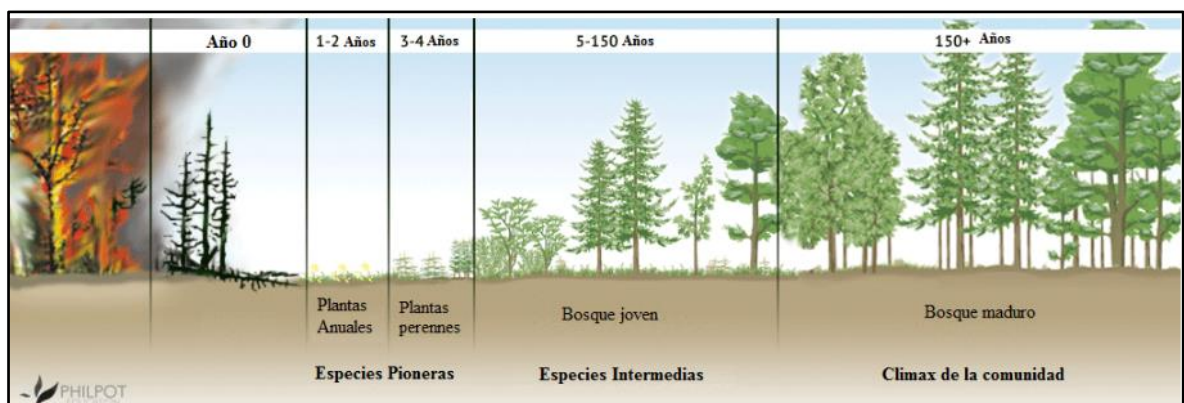


Figura 43: Gráfico de la recuperación de la vegetación quemada. Fuente: Philpoteducation. *Communities and ecosystems.*

En primer lugar, se han calculado los NDVI y las dNDVI para ver los cambios de la cobertura vegetal. La diferencia de NDVI en este caso se calcula con la fórmula de antes (Ecuación 9), pero la imagen de post incendio se ha utilizado de 2020.

$$dNDVI = NDVI_{post} - NDVI_{pre}$$

Ecuación 12: Fórmula para calcular la delta de NDVI

En segundo lugar, nos interesa realizar la cartografía de severidad del incendio de 2020. Para ello se ha calculado la dNBR (Ecuación 13), donde NBR_{post} es de la imagen de 2020. Finalmente se ha reclasificado la capa según los criterios de USGS (ver la parte 4.7).

$$dNBR = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

Ecuación 13: Fórmula para calcular la delta de NBR post-incendio

4.9. Construcción del visor en ArcGIS Online

La creación del visor web cartográfico es el objetivo principal de este TFM y conlleva la realización de varios pasos para implementarlo. Esta parte es la última del capítulo de la metodología del estudio sobre los GIFs de Galicia. Es de gran importancia la realización correcta de los cálculos de los apartados anteriores y gracias a dichos cálculos, es posible construir un visor web para presentar la información de manera atractiva e interactiva.

La construcción del visor cartográfico se ha hecho a través de la plataforma ArcGIS Online cuyo funcionamiento consiste en consulta, búsqueda, leyenda, impresión y mapas base. Además, se permite compartir la información temática a través de un entorno web amigable e intuitivo para manejar sobre una misma plataforma.

Las capas que se han añadido dentro del visor son las siguientes:

- El contorno del área quemada por GIF;
- Severidad de 2017 y de post incendio de 2020 para analizar los cambios y ver como se regenera la vegetación;
- Las capas de SIOSE (cobertura de la vegetación afectada y cobertura de usos del suelo);
- Actividad fotosintética según los índices NDVI de 2017 (pre y post incendio) como un método más que utilizado para el análisis de severidad de un incendio.

Para publicar los mapas de las zonas afectadas por GIF en la plataforma ArcGIS Online se ha utilizado la herramienta ArcGIS Pro.

Como paso de preparación de las capas, se han vectorizado todas las de raster utilizando la herramienta *Raster to Polygon* (capas de Severidad y capas de Actividad fotosintética).

Posteriormente se ha analizado las capas que contienen la misma proyección. La proyección necesaria para la publicación en ArcGIS Online es *WGS_1984_UTM*.

Al abrir ArcGIS Pro se han guardado las capas de Severidad y Actividad fotosintética en el formato Layer File (.lyr) de manera que todas las capas pertenezcan el mismo formato.

En el próximo paso se han configurado los parámetros del mapa web en la pestaña “Share As Web Map” (Map->Share->Web Map): el nombre del mapa, la descripción y la carpeta donde se guarda el mapa final (Figura 44).

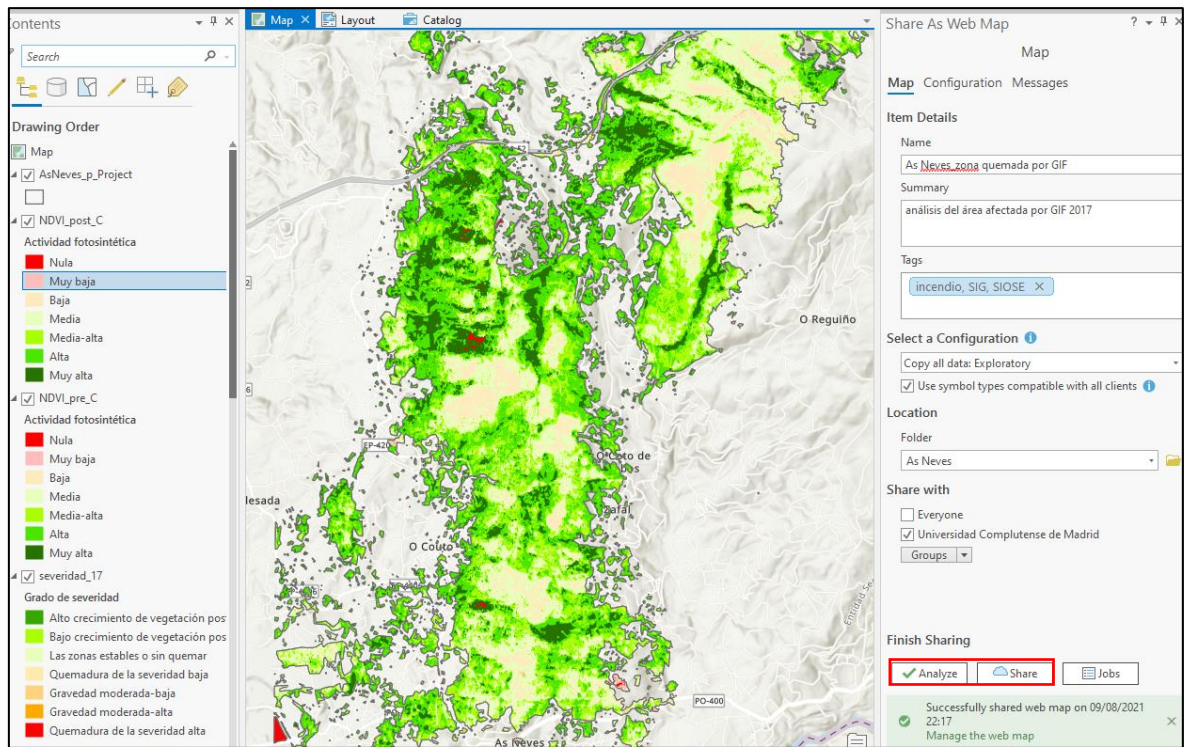


Figura 44: Proceso de la publicación el mapa web en ArcGIS Online a través de ArcGIS Pro.

En tercer lugar, se han analizado los errores y posteriormente se ha publicado en el portal ArcGIS Online dentro de la carpeta del trabajo, pulsando el botón *Share*.

Al abrir ArcGIS Online en un Map Viewer se han modificado la simbología y los nombres de las capas y se han creado y configurado las ventanas emergentes (Figura 46).

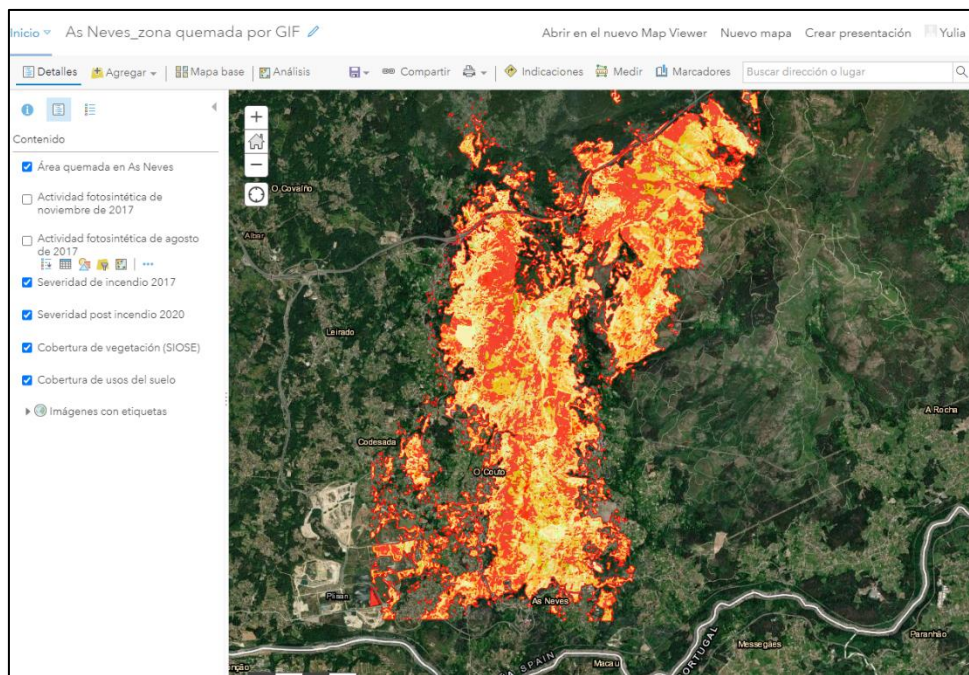


Figura 45: Presentación de la página principal en ArcGIS Online.

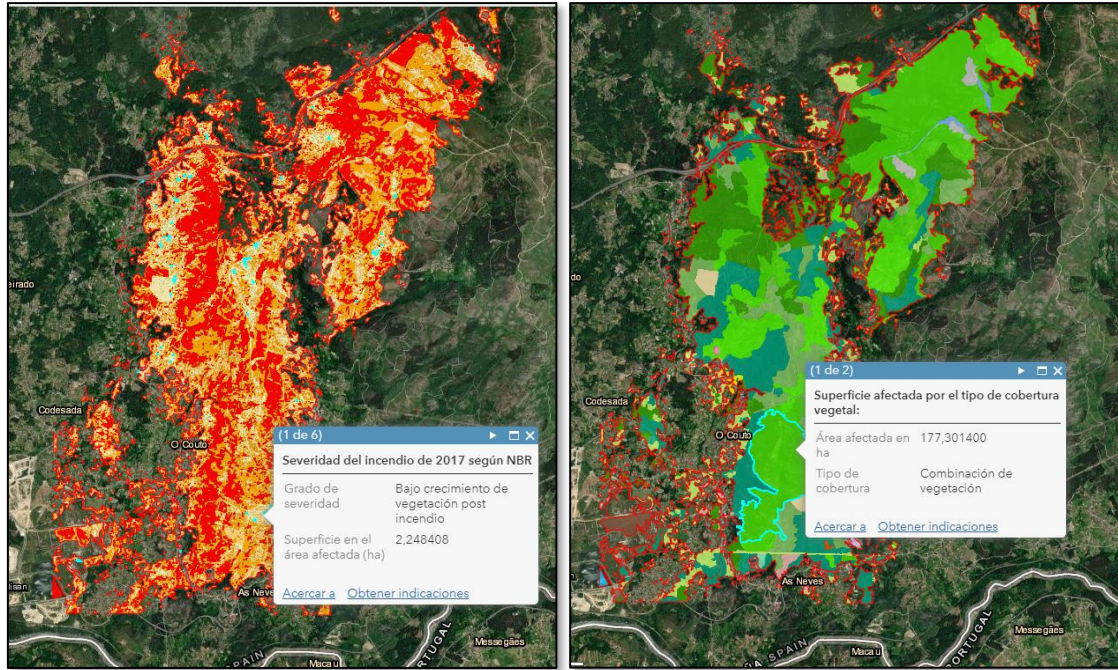


Figura 46: Creación de las ventanas emergentes

Las ventanas emergentes se pueden configurar con un estilo personalizado o usar la lista de atributos como referencia. En este visor se han utilizado los atributos del área afectada (para todas las capas), tipo de uso (para la capa de cobertura de usos del suelo), tipo de cobertura (para SIOSE de vegetación), grado de severidad (para las capas de severidad) y grado de actividad (para actividad fotosintética).

Después de guardar los resultados conseguidos, al abrir la pestaña *Compartir* se ha creado la aplicación web mediante *Web AppBuilder* de ArcGIS Online (Figura 47):



Figura 47: Presentación de la plantilla del *Web AppBuilder* dentro de ArcGIS Online

Para construir dicho visor es necesario configurar varios atributos (Figura 48):

- en la pestaña Tema se elige el tema y los colores;
- la pestaña Mapa permite elegir el mapa web sobre que se desarrolla el visor y se establece la extensión al iniciar el visor;
- en la pestaña Widget se modifica que herramientas se van a incluir dentro del visor;
- la pestaña Atributos se configura el título, subtítulo y la descripción detallada

En el visor contruido se han añadido siguientes widgets:

- Para una mejor búsqueda y manejo de las zonas de interés se ha construido el Widget *Marcador*;
- Para filtrar las zonas dañadas por categorías (por el tipo de cobertura, por el grado de severidad como ejemplos) se ha añadido el widget *Filtro*;
- Para hacer comparaciones visuales de la recuperación vegetal se aplica el widget *Swipe*.

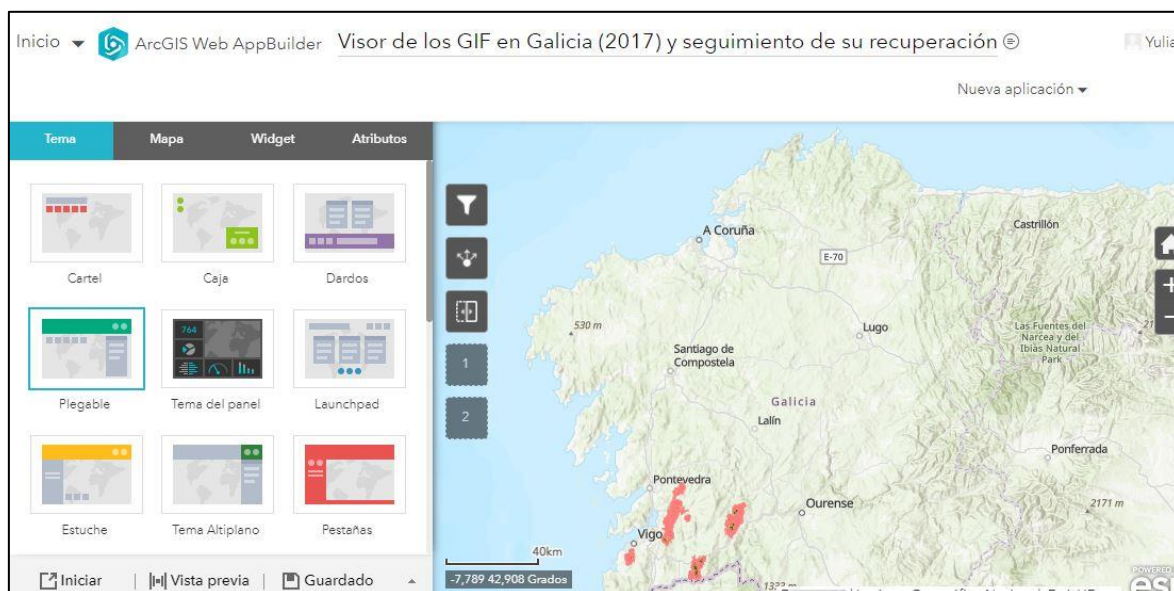


Figura 48: Interfaz de la configuración del visor web

Los próximos pasos para visualizar el resultado de construcción del visor web son guardar los resultados de la configuración e iniciar el visor (Figura 49).



Figura 49: Visor web cartográfico creado a través de ArcGIS Online

El visor cartográfico creado como una aplicación web a través de la plataforma ArcGIS Online nos permite visualizar la información de manera atractiva e intuitiva de manejar. El funcionamiento de dicho visor consiste en la búsqueda de la información específica, consultar las áreas afectadas según sus tipos de cobertura, grado de severidad y grado de actividad fotosintética, cambiar el mapa base, visualizar la leyenda, filtrar información, hacer el análisis de la recuperación vegetal y compartir la información de manera interactiva.

Además, el visor incluye las ventanas emergentes que se han creado en el paso anterior por las cuales se hace la consulta de las áreas afectadas de forma muy rápida.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados demuestran que el año 2017 fue una época muy vulnerable para la vegetación de Galicia. Los mapas de severidad representan los grados de daño (severidad de 2017) y niveles de recuperación (severidad de 2020). Se han analizado 5 áreas quemadas de las provincias Pontevedra y Ourense, las más dañadas en toda Galicia en 2017 (Tabla 8).

5.1. Resultados obtenidos según el flujo de trabajo para preparar las capas del visor

En este apartado se presentan los resultados que han sido obtenidos para el área quemada del municipio As Neves como un ejemplo.

Los resultados obtenidos de la severidad de 2017 se aprecian en la Figura 50 y demuestran que dentro del área quemada el grado de la severidad es muy alto o moderado-alto, es decir, la mortalidad de la vegetación es muy alta justo en el periodo después del incendio.

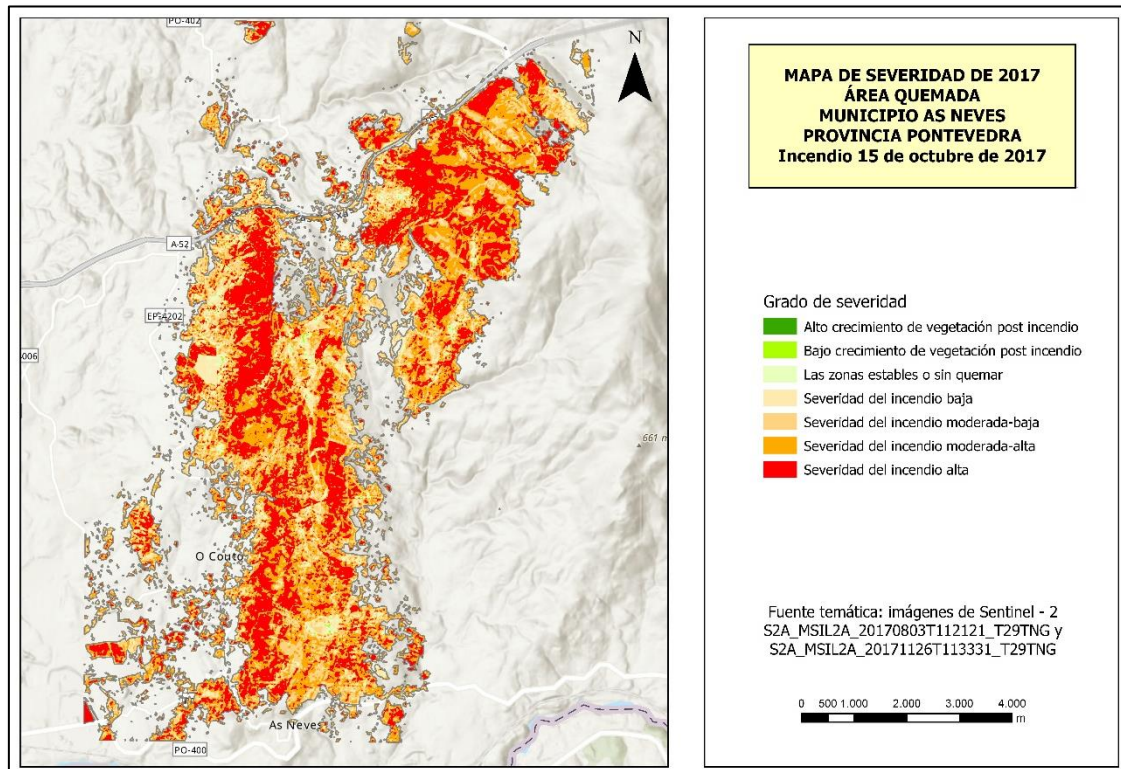


Figura 50: Versión del mapa final de la severidad

El análisis comparativo de la actividad fotosintética antes y después del incendio se puede apreciar en la Figura 51. Antes del incendio la zona de estudio tenía actividad fotosintética muy alta, lo que significa que el 90% de la cobertura de la superficie total era la vegetación sana. La imagen posterior del incendio presenta los valores de actividad fotosintética entre media y media-alta. Esa bajada de actividad se explica por la pérdida de la vegetación sana debida al GIF. Por otro lado, se puede explicar que la actividad fotosintética baja y media fue provocada por las temperaturas elevadas y la sequía del verano.

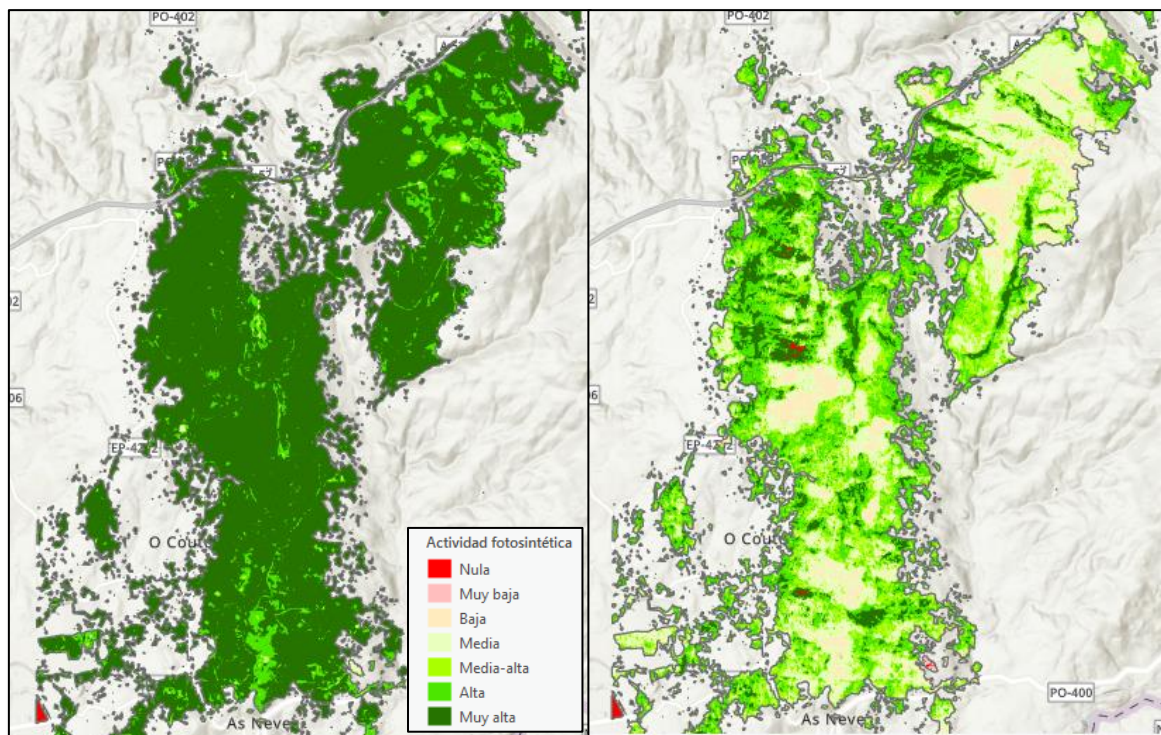


Figura 51: Ejemplo de análisis comparativo de la actividad fotosintética antes (a la izquierda) y después del incendio (a la derecha)

El resultado de análisis de afección de los distintos usos y la cobertura vegetal se ha generado como mapas en las figuras 52 y 53:

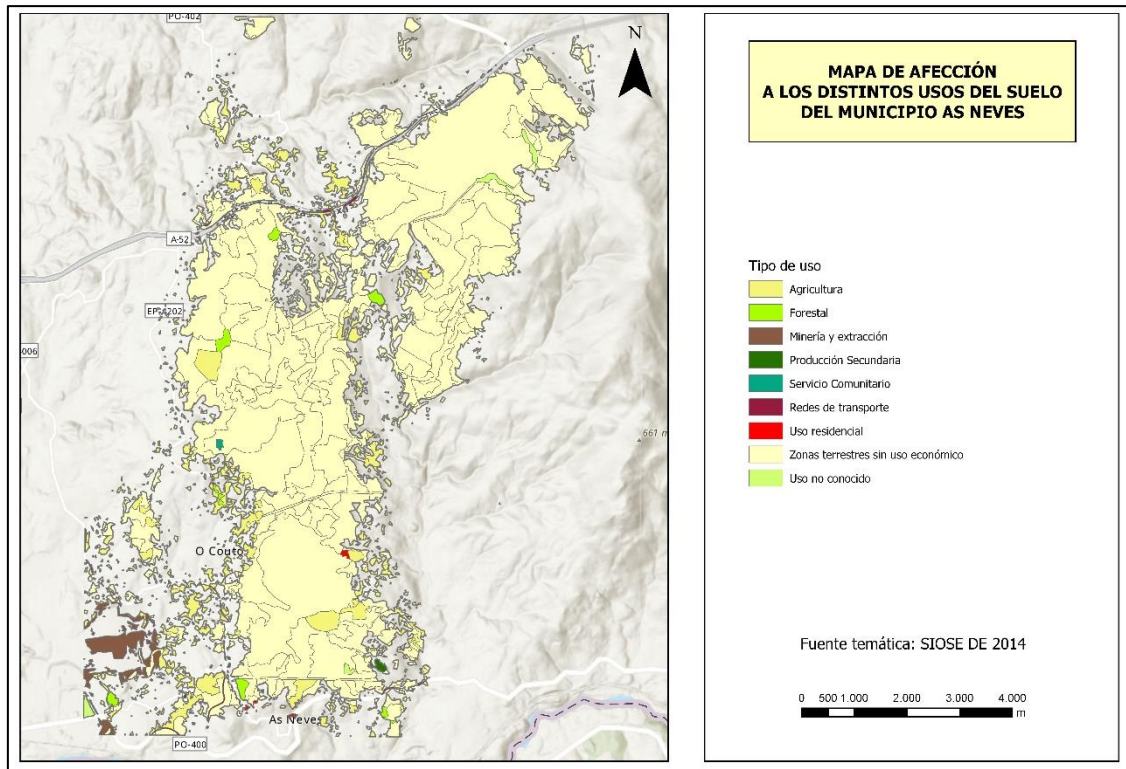


Figura 52: Mapa de afección a los distintos usos

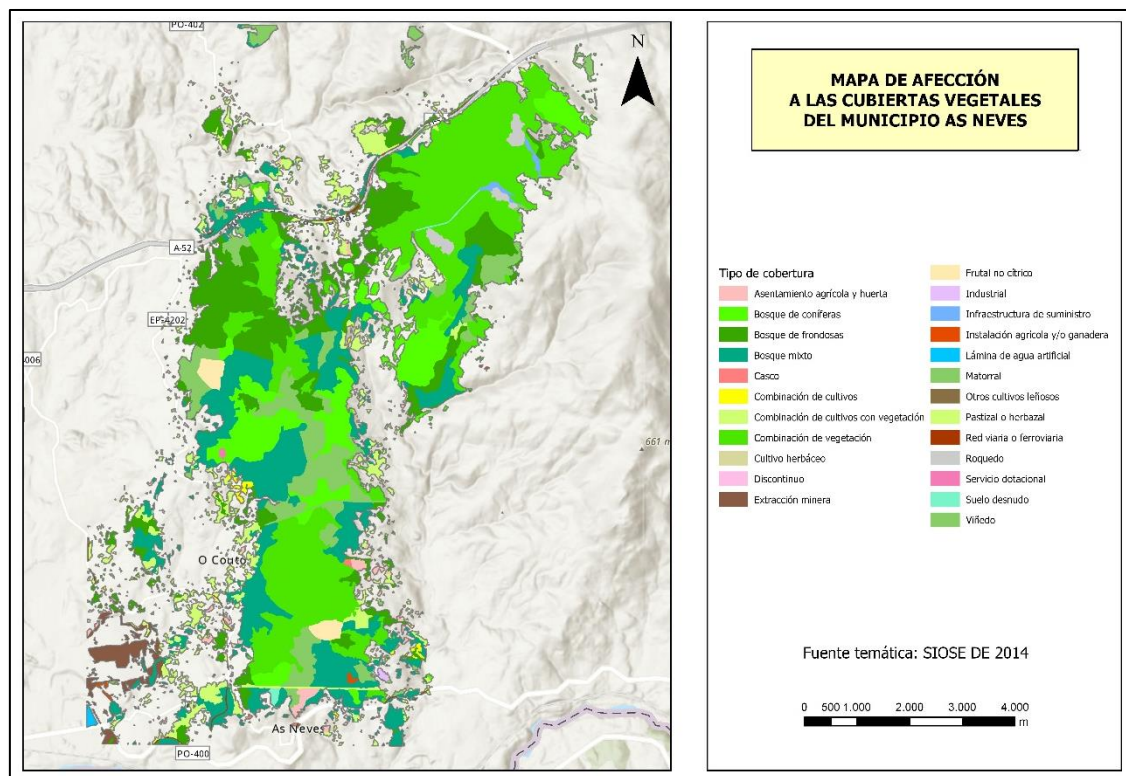


Figura 53: Mapa de afección a las cubiertas vegetales

Según las imágenes obtenidas del área quemada en el municipio As Neves, la mayor cobertura del área quemada afecta a la combinación de vegetación, bosque mixto y bosque de frondosas y el mapa de uso del suelo afecta a las zonas terrestres sin uso económico. El porcentaje de la superficie afectada con severidad alta por tipo de cobertura se ha calculado en Excel y se presenta en la tabla 18 y 19.

Código de cobertura	Descripción	Superficie	%
631	Zonas terrestres sin uso económico	2137	33,5
110	Agricultura	241	14,1
130	Minería y extracción	40	22,5
120	Forestal	19	15,8
	Σ	2466	

Tabla 18: Superficie afectada por el tipo de usos

Código de cobertura	Descripción	Superficie (ha)	%
340	Combinación de vegetación	705,91	43,13
313	Bosque mixto	489,02	27,13
311	Bosque de frondosas	408,82	25,44
312	Bosque de coníferas	253,42	24,86
330	Matorral	245,79	41,50
260	Combinación de cultivos con vegetación	173,81	18,18
123	Extracción minera	39,53	22,77
	Σ	2466	

Tabla 19: Superficie afectada por el tipo de cobertura vegetal

En la tabla 19 se ha obtenido los resultados de la vegetación quemada en los GIF de 2017. En la columna de superficie (ha) se aprecia la cobertura total en hectáreas dentro de la zona quemada por el tipo de vegetación. Posteriormente, se ha calculado el porcentaje de superficie afectada con severidad alta, cuyos valores se incluyen en la columna derecha: los tipos de vegetación más afectados son los de combinación de vegetación y matorral con los valores de 43,13 % y 41,50% respectivamente. Los bosques que han sufrido menos: mixto – 27,13%, de frondosas – 25,4%, de coníferas – 25% dentro de la categoría de la severidad alta.

Los resultados del análisis del grapo de recuperación se visualiza mediante la dNDVI que se puede observar en la Figura 54.

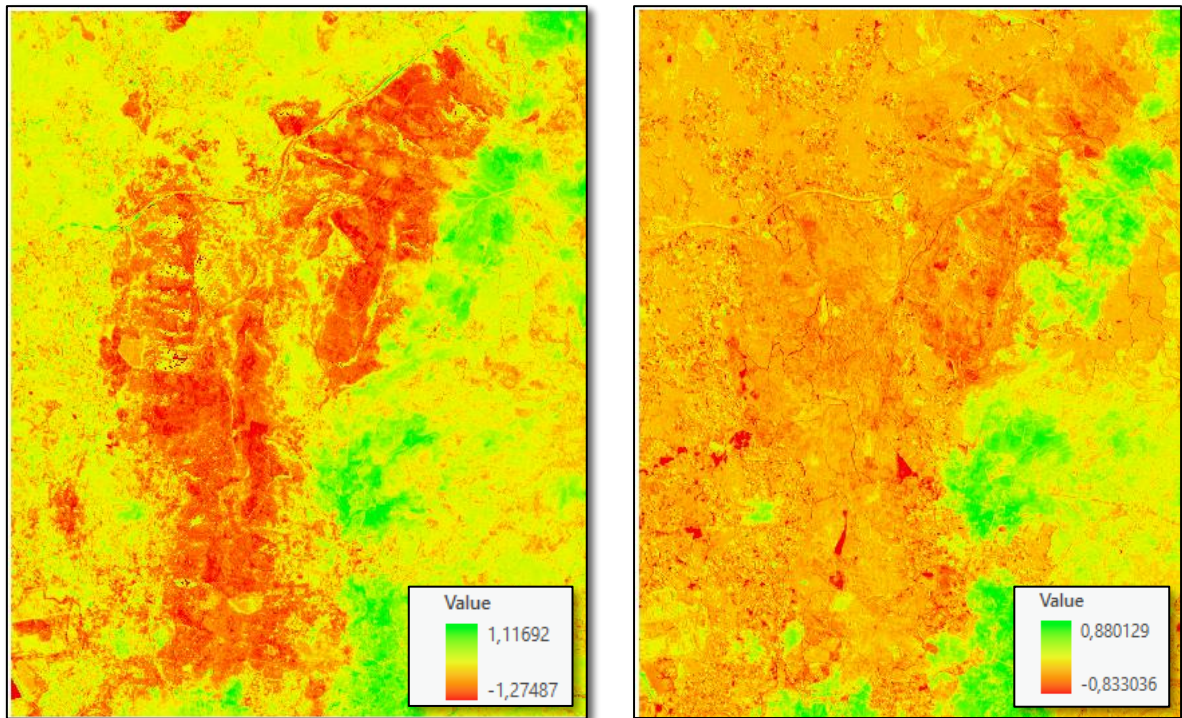


Figura 54: Comparación de la zona quemada entre 2017 y 2020 según dNDVI.

En la imagen de la izquierda, el color rojo representa los valores altos y señala la zona quemada. En la imagen derecha se aprecia el cambio del área quemada y el nivel de la recuperación.

El nivel de recuperación visualmente se puede observar en la Figura 55. Para eso se compara dos imágenes de severidad (la de 2017 y la de 2020).

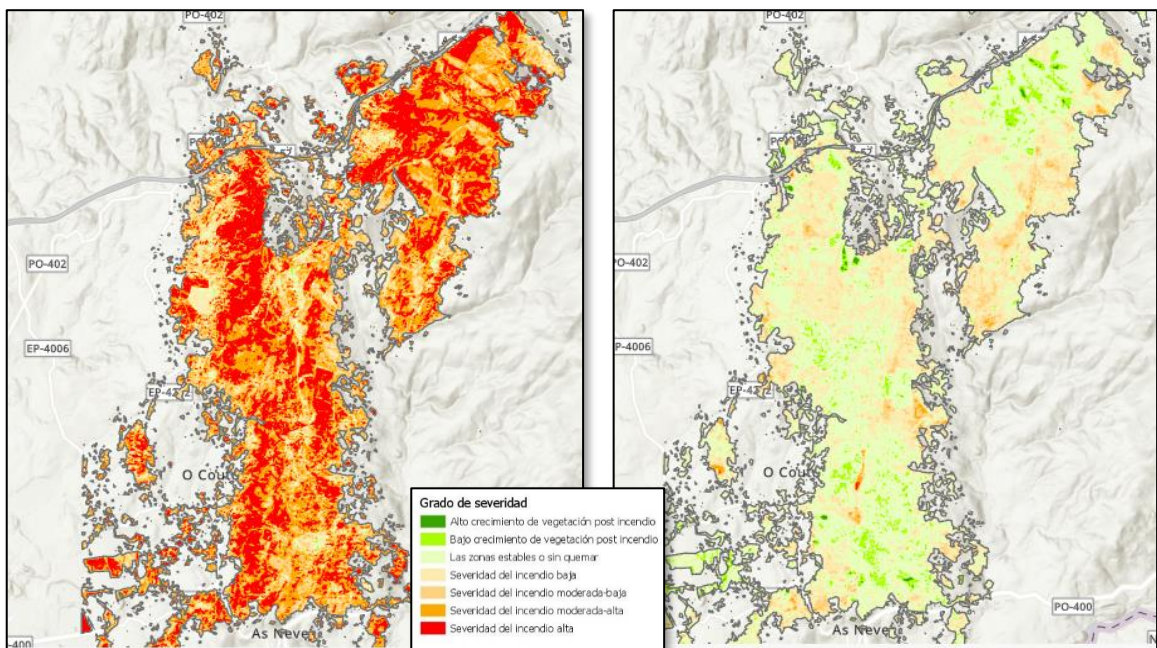


Figura 55: Comparación de la severidad post-incendio a corto plazo (la imagen de 2017) y la severidad post-incendio a largo plazo (la imagen de 2020)

La cartografía final de la severidad de 2020 lo podemos observar en la Figura 56:

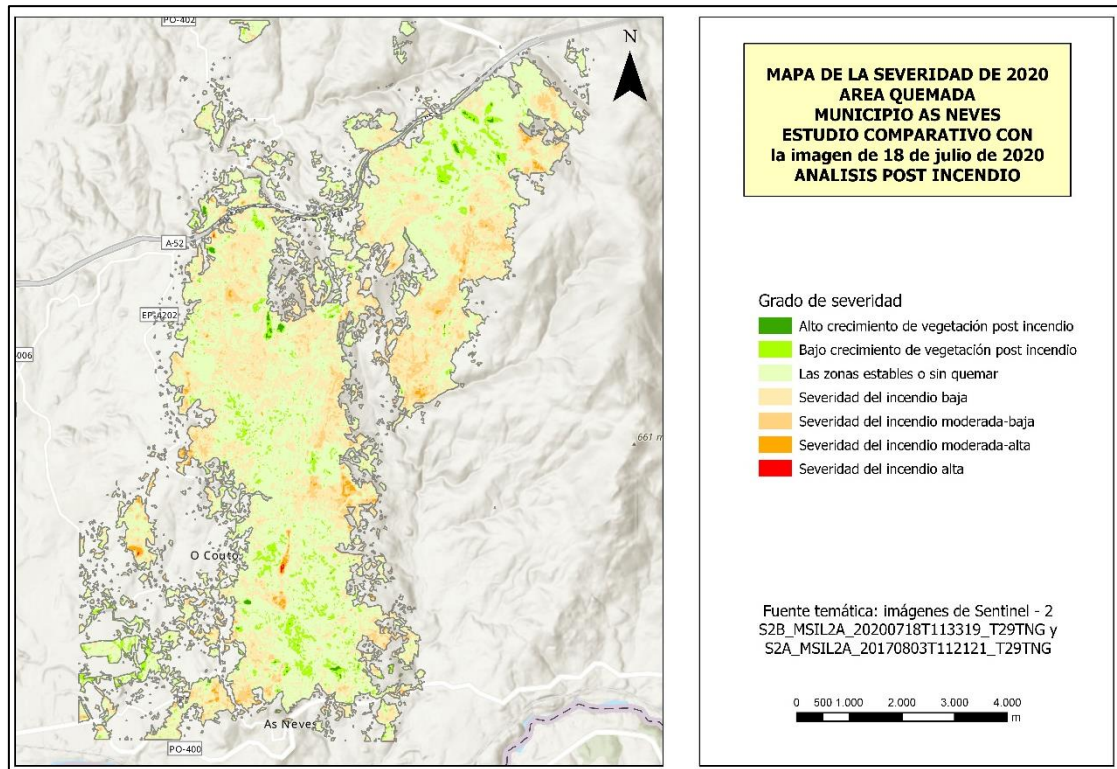


Figura 56: Mapa de severidad para el 18 de julio de 2020

Descripción	Area_ha	%
Zonas estables o sin quemar	1330,6	54,1
Severidad del incendio baja	818,6	33,3
Severidad del incendio moderada-baja	155,7	6,33
Bajo crecimiento de vegetación post incendio	129,7	5,27
Severidad del incendio moderada-alta	16,73	0,68
Alto crecimiento de vegetación post incendio	7,84	0,32
Severidad del incendio alta	0,53	0,02
Total	2459,9	

Tabla 20: Cálculos de la cobertura en hectáreas y porcentajes de la cobertura por el grado de la severidad post incendio (18 de julio de 2020)

Según los resultados obtenidos en la tabla 20 se aprecia que el 54% de la cobertura del área quemada pertenece a las zonas estables o sin quemar y 33% de la quemadura de la severidad baja. Por lo tanto, se puede concluir que la zona afectada de 2017 tiene una tendencia positiva hacia la recuperación de la vegetación dañada.

5.2. Visualización de las áreas quemadas de los GIF en el visor construido

El visor que ha sido desarrollado en este trabajo está disponible por el siguiente enlace:

[Visor de los GIF en Galicia \(2017\) y seguimiento de su recuperación](#)

El visor construido representa la cartografía de las áreas quemadas de los siguientes municipios: Melón, Lobios, Pontearreas, Nigrán y As Neves. Con el widget Marcador se elige la zona que nos interesa el visor ubica exactamente en el área de análisis (Figura 57).



Figura 57: Demostración del widget Marcador dentro del visor desarrollado

Dentro la zona elegida el visor permite hacer un análisis diverso. Como uno de los ejemplos, permite realizar la consulta de las zonas más dañadas, es decir, con el valor de severidad alta. Para ello, se aplica el widget *Filtro* y se elige dentro del área solo el grado con severidad alta. El resultado aparece en la Figura 58 destacar que mediante este filtro se puede hacer cualquier tipo de consulta.

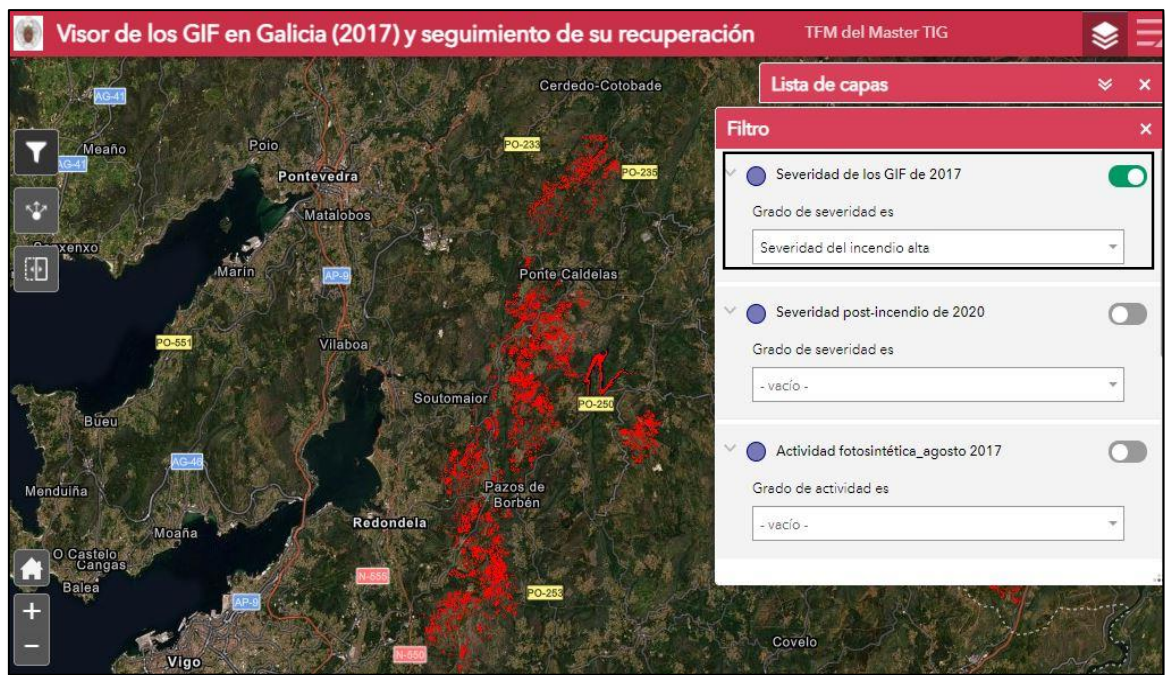


Figura 58: Demostración del widget Filtro dentro del visor

Además del *Filtro*, la consulta sobre los servicios publicados dentro del visor se puede realizar a través de las ventanas emergentes, cuya construcción fue descrita en la parte 4.9. Este método nos permite ver la información de manera muy cómoda e interactiva. El objetivo de determinar la cobertura de vegetación por cada área ha sido cumplido mediante el uso de la capa SIOSE, aplicando la simbología para cobertura vegetal y mostrando la información en el visor a través de ventanas emergentes. Al pulsar en la zona de interés se puede visualizar la información sobre la cobertura como en el ejemplo de la Figura 59.

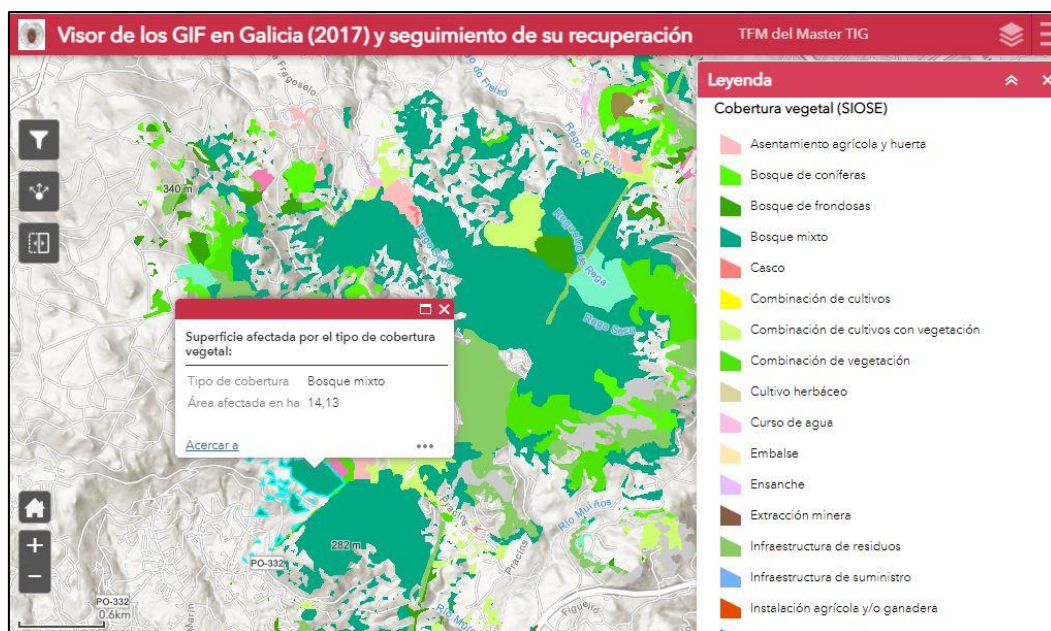


Figura 59: Ejemplo de una consulta mediante las ventanas emergentes

Uno de los objetivos específicos del trabajo es evaluar la recuperación de la vegetación desde el periodo del incendio hasta el año 2020. Para ello se ha calculado la severidad del año 2020. El visor creado nos permite analizar la evolución de la recuperación comparando dos capas (la severidad de 2017 y la severidad de 2020) a través del widget Swipe.

Este widget representa una barra vertical con la cual se puede observar el resultado de cambios de la severidad. Posibilita ver la diferencia y estimar las zonas que se están recuperando (Figura 60).

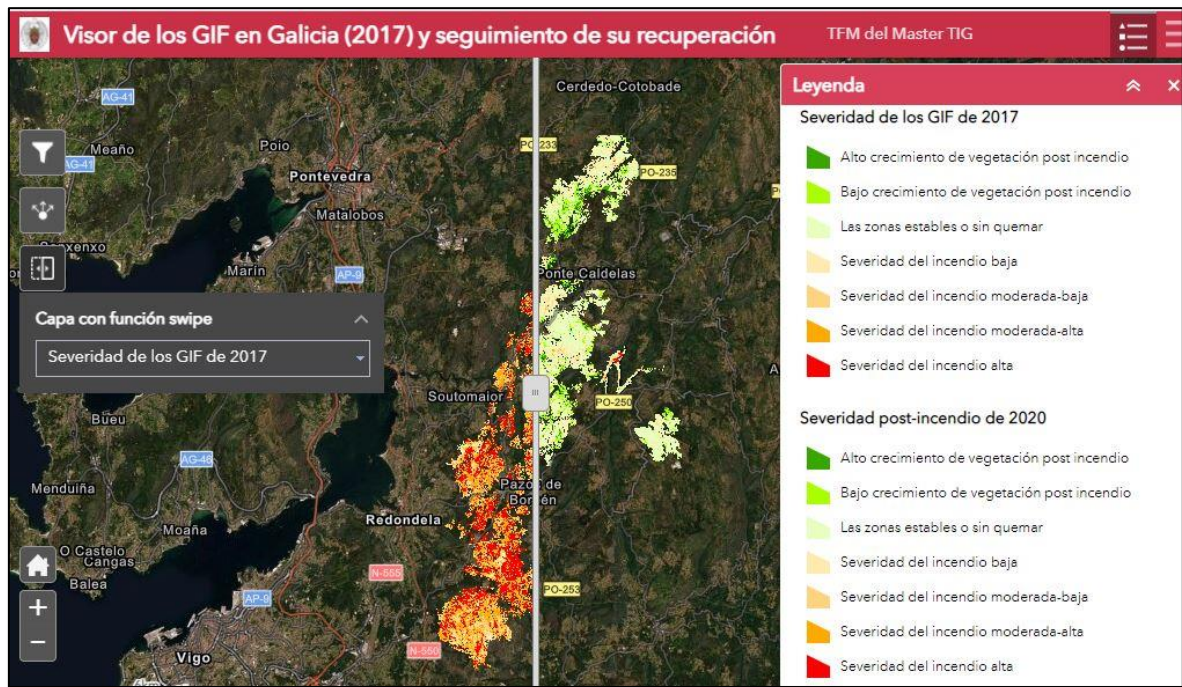


Figura 60: Demostración del widget Swipe dentro del visor

5.3. Discusión: comparación con estudios anteriores

La metodología desarrollada sobre la delimitación del área quemada y el cálculo de la severidad muestra que los resultados dependen en gran medida del índice que se utilice para su obtención. Quignard (2016) ha analizado la precisión del uso de varios índices para delimitar el área quemada y presenta las siguientes conclusiones: 75% para el NBR, 65% para el NDVI y 50% para el BAI. En el caso de este trabajo se ha utilizado los índices NDVI y NBR, cuyos cálculos han demostrado obtener los resultados más precisos.

Chuvienco y Garcia (2014) han llevado a cabo estudios sobre la fiabilidad del índice NBR para trabajar con áreas quemadas y su delimitación. En este trabajo, en la mayoría de los casos, se ha elegido el índice NDVI para delimitar la zona debido a la mejor visualización resultante de calcular dicho índice.

Bastarrিকা et al. (2011) ha calculado y estudiado los valores adecuados para establecer umbrales (píxeles “semilla”) con el objetivo de detectar la zona quemada. Dichos valores varían en función de los índices elegidos. En este estudio se determinaron 3 zonas a través

del NDVI y las dos restantes se han calculado mediante el NBR, de acuerdo a la precisión obtenida en cada caso. Se han utilizado valores de los umbrales diferentes para NDVI y para NBR tal y como se presenta en la Tabla 1.

Basándose en la metodología Montorio Llovería (2014), se ha analizado la severidad post-incendio de una imagen actual para evaluar la recuperación vegetal. Con los resultados obtenidos se puede realizar una evaluación del grado de regeneración de la vegetación.

El estudio de Martorell (2019) sobre la construcción del visor que se ha utilizado como referencia para este trabajo se basa en el desarrollo de este mediante la herramienta Leaflet. Su empleo es más accesible debido a que es una librería abierta, completa y gratuita, a diferencia de ArcGIS Online que es la que se ha utilizado en este trabajo. Esta requiere de licencia y su manejo es más complejo, aunque como contrapartida posibilita la creación de visores con más herramientas, más funcionales y completos.

Basándose en la información oficial (MITECO, 2017) de las áreas afectadas por los GIF podemos concluir que los cálculos que se han obtenido en este trabajo tienen una buena precisión.

Después de haber delimitado el área quemada se han analizado los valores obtenidos con SIG y los datos oficiales.

Según la estadística del Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO) el área quemada en el municipio As Neves fue afectada por 2818,49 ha de cobertura del GIF (Tabla 7).

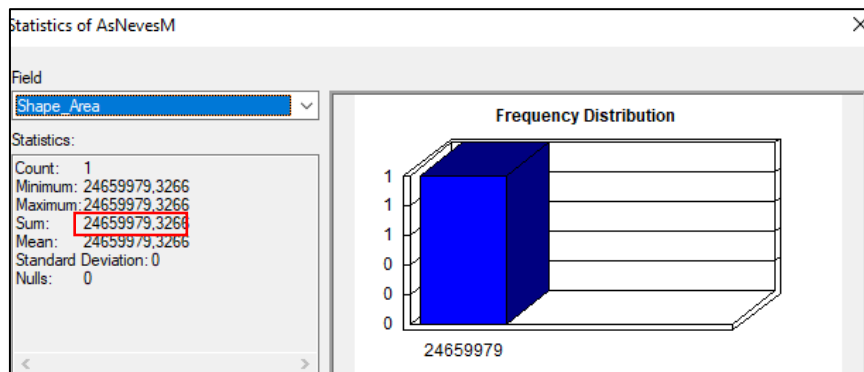


Figura 61: Resultado de estadística del área quemada a través de SIG

De acuerdo a la investigación con ArcMap se ha obtenido el valor de 2466 ha de la cobertura de GIF (Figura 61). Con este resultado se demuestra que la metodología de la delimitación de la superficie dañada del este trabajo es adecuada y se puede justificar la aplicación de este método para otras áreas de estudio afectadas por GIF.

En la Figura 63 se aprecia el área quemada del municipio Melón. De acuerdo a los resultados, se ha obtenido una zona afectada de 5134 ha. La estadística oficial recoge que el área quemada en Melón cuenta con 5966 ha (Tabla 21), por lo que se puede concluir que el método de teledetección para delimitar el área quemada es eficiente.

Las Figuras 64, 65 y 66 muestran las áreas quemadas de tres municipios: Lobios, Pontareas y Nigrán. Los cálculos obtenidos en estos dos casos no son tan precisos como en el escenario de Melón y As Neves debido a la cobertura de las imágenes y a la existencia de nubes, que han dificultado alcanzar valores más cercanos a la verdad terrena.

Según nuestros cálculos hemos obtenido las siguientes áreas dañadas por GIF: Lobios – 2433 ha, Pontareas – 5986 ha, Nigrán – 813 ha. De acuerdo con la estadística oficial los tres municipios cuentan con las áreas quemadas de 3426 ha, 8878 ha y 1483 ha respectivamente (Tabla 21).

Masot (2017) describía en su estudio el grado de coincidencia entre los resultados obtenidos mediante teledetección y las cifras oficiales publicadas, siendo para el caso particular de las imágenes de Sentinel-2 de un 93%. Los estudios previos y los resultados obtenidos en este estudio muestran que la metodología es adecuada para delimitación del área quemada.

Municipio	Datos oficiales (MITECO, 2017)	Cálculos mediante SIG
As Neves	2818,49 ha	2466 ha
Melón	5966 ha	5134 ha
Lobios	3426 ha	2433 ha
Pontareas	8878 ha	5986 ha
Nigrán	1483 ha	813 ha

Tabla 21: Comparación las superficies afectadas por los GIF

5.4. Futuras líneas de investigación

El visor creado mediante ArcGIS Online tiene una amplia funcionalidad, permitiendo además añadir más herramientas y mejorar el servicio. Este trabajo se ha planteado como base para futuros estudios. Por ejemplo, en este estudio se han utilizado las imágenes de Sentinel-2, pero también se podrían utilizar la de Landsat u otros sensores, en función del año y área de investigación y de los objetivos que cada usuario quiera conseguir.

El flujo de trabajo se podría aplicar a otros índices para calcular el área afectada por los GIF y comparar la fiabilidad de estos índices en la estimación de daños, así como también modificar los umbrales de delimitación del área según diferentes metodologías que no han sido descritas en este trabajo.

El visor desarrollado hace uso de gran variedad de widgets y está abierto a ampliar la visualización con la funcionalidad de otras herramientas que se podrían añadir en futuras investigaciones.

6. CONCLUSIONES

Este trabajo se centra en el cumplimiento del objetivo principal: creación del visor web cartográfico con el seguimiento de las áreas afectadas por los GIF en Galicia en 2017. Los resultados obtenidos permiten ver la utilidad del uso del visor, el cual facilita el compartir la información de manera amigable, intuitiva y con más posibilidades. En comparación con el funcionamiento de mapas estáticos, el visor permite tratar y almacenar más cantidad de datos.

El análisis a través de teledetección ayudó a delimitar las zonas quemadas, calcular el grado de severidad y evaluar la evolución de la vegetación recuperada sin salir a campo. La metodología de este trabajo es general y permite aplicar los pasos a otras zonas de interés y se propone como plantilla para futuras investigaciones.

Aunque no es objetivo de este estudio, se necesitarían validaciones con trabajo de campo y otras premisas en los estudios de recuperación de la vegetación (políticas forestales, usos de suelo y evolución meteorológica posterior al incendio). Este trabajo se basa en metodologías de teledetección y presentación cartográfica en el visor. Para hacer un trabajo completo de recuperación vegetal tras un incendio necesitan metodologías complejas y multidisciplinares.

Basándose en las metodologías descritas en el capítulo 2 (Marco teórico), se ha desarrollado el flujo de trabajo para esta investigación, cuyo esquema se puede ver en el Anexo I.

Uno de los objetivos específicos consistía en la automatización de los procesos de cálculo para el seguimiento del análisis del área quemada. El algoritmo de automatización se ha desarrollado en la herramienta de ArcMap, llamada Model Builder. Esta herramienta ha permitido crear un modelo para aplicarlo posteriormente en otras zonas afectadas por los GIF. Dicho modelo, desarrollado dentro de ArcMap, se puede consultar en el Anexo II.

La metodología de este trabajo se desarrolló para un área concreta y posteriormente se ha aplicado a otras zonas. Para ver los resultados de severidad de todas las zonas que se han incluido en el visor, se puede consultar la cartografía generada para dichas zonas en el Anexo III.

En conclusión, se considera que este trabajo ha cumplido con los objetivos inicialmente marcados. En comparación con otros estudios, se puede destacar el nivel de detalle conseguido en cuanto al análisis de las áreas quemadas y al desarrollo del visor cartográfico.

7. REFERENCIAS

Libros, artículos y revistas

1. Bastarrika, A., Chuvieco, E. & Martín, M.P. (2011): "Mapping burned area from Landsat TM/ETM+ data with a two-phase algorithm: Balancing omission and commission errors", *Remote Sensing of Environment*, 115, 1003-1012.
2. Bastos Fernández, I. (2015). El comportamiento de las especies forestales de Galicia durante el fuego y después del fuego, Comunidad de Montes de Matamá. Montes de Vigo.
3. Bisquert, M et al. (2010). Los índices de vegetación como indicadores del riesgo de incendio con imágenes del sensor Terra-Modis. *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible*. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección.
4. Chuvieco Salinero, Emilio (1999). Serie Geográfica. Incendios Forestales. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá, Servicio de Publicaciones, Departamento de Geografía.
5. Chuvieco, E. (2002): *Teledetección ambiental: observación de la tierra desde el espacio*. Barcelona, Ariel Ciencia.
6. Chuvieco, E.; Pilar Martín, M.; Palacios A. (2002). "Assessment of Different Spectral Indices in the Red-Near-Infrared Spectral Domain for Burned Land Discrimination". *Remote Sensing of Environment* 112, 2002: 2381-2396
7. Chuvieco, Emilio (1996). *Fundamentos de Teledetección espacial*. Madrid: Ediciones Rialp, S.A.
8. De Santis A. y Chuvieco, E. (2007): Burn severity estimation from remotely sensed data: performance of simulation versus empirical models. *Remote Sens Environ* (108), 422-435.
9. Delgado Arango, Natalia; Vicente Mariño, Miguel (2019). La cobertura periodística de los incendios forestales en la prensa digital de España: el caso de Galicia 2017. *Revista Española de Comunicación en Salud*
10. Dorrego, X; Álvarez, G (2009). *Teledetección y SIG en la gestión de los incendios forestales en Galicia*. *Teledetección: Agua y desarrollo sostenible*. XIII Congreso de la Asociación Española de Teledetección.
11. Duncan J. et al. (1993): Assessing the relationship between spectral vegetation indices and shrub cover in the Jornada Basin, New Mexico. *Int J Remote Sens* (14), 3395- 3416
12. Fernández-Couto, Tomás (2005). *Los incendios forestales en Galicia*. Universidad de Valencia, RSEAPV.
13. Franco Lamas, Antonio (2015). *Geografía física de Galicia*. Trabajo fin de Grado.
14. García, M. y Chuvieco, E. (2004). "Assessment of the potential of SAC-C/MMRS imagery for mapping burned areas in Spain", *Remote Sensing of Environment* 92, pp. 414-423.
15. González-Alonso, F et al. (2007). Un nuevo algoritmo para la cartografía de áreas quemadas a partir de imágenes Awifs y Modis. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, Universidad de La Rioja.

16. Hidalgo Vega, J.A (2016). Prioridades de restauración de áreas forestales quemadas. Pontevedra: Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales
17. Huete, A. R. (1988). "A soil-adjusted vegetation index (SAVI)", *Remote Sensing of Environment* 25, pp. pp.295-309.
18. Hunt E., y Rock B. (1989). Detection of changes in leaf water content using near and middle-infrared reflectances. *Remote Sens Environ* (30), 43-54
19. Jordán, Antonio; Cerdà, Artemi (2010). Avances metodológicos e innovación técnica en el estudio de los suelos afectados por incendios forestales. Cátedra de Divulgació de la Ciència, Universitat de València, FUEGORED
20. Jordán, Antonio; Cerdà, Artemi (2010). Métodos y técnicas para el estudio de suelos afectados por incendios forestales. Retos para la investigación. Cátedra de Divulgació de la Ciència, Universitat de València, FUEGORED
21. Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment (LA). FIREMON: Fire Effects monitoring and inventory system. General technical report RMRS-GTR-164-CD, LA-1.
22. Key, C.H.; Benson, N. (1999). The Normalized Burned Ratio, a Landsat TM radiometric index of burn severity incorporating multi-temporal differencing. U.S. Geological Survey
23. 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. En: FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. (Eds. D.C. Lutes, R.E. Keane, J.F. Caratti, C.H. Key, N.C. Benson, y L.J. Gangi). USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station General Technical Report.
24. M. Ponte Pintor, Jesús; Bandín Buján, Carlos (2008). Los incendios forestales en Galicia y su investigación. Estudios penales y criminológicos. Comandancia de la Guardia Civil, A Coruña.
25. Martín A et al. (2013). Recuperación de un suelo bajo diferente tipo de vegetación un año después de sufrir un incendio no controlado de alta intensidad
26. Martín, M. P. (1998). Cartografía e inventario de incendios forestales en la Península Ibérica a partir de imágenes NOAA-AVHRR. En el Departamento de Geografía. Alcalá de Henares: Universidad de Alcalá.
27. Martínez Sánchez, Susana et al. (2003). Comparación de distintas técnicas de análisis digital para la cartografía de áreas quemadas con imágenes Landsat ETM. *Geofocus: Revista Internacional de Ciencia y Tecnología de la Información Geográfica*.
28. Martorell Guerrero, G. (2019) El visor cartográfico frente al mapa: una propuesta para mejorar la comunicación geográfica. Universidad de las Islas Baleares, Facultad de Filosofía y Letras
29. Masot, N. et al. (2017). Delimitación y análisis del incendio forestal de Sierra de Gata (Cáceres) mediante imágenes de los satélites Landsat-8 y Sentinel-2. Universidad de Extremadura, Departamento de Arte y Ciencias del Territorio.
30. Montorio Llovería, R et al. (2014). La severidad del fuego: revisión de conceptos, métodos y efectos ambientales. Departamento de Ciencias Ambientales, Universidad Técnica Estatal de Quevedo, Ecuador

31. Moreno, M. Vanesa; Chuvieco Emilio; Pezzatti, Gianni Boris (2015). Evolución del régimen de incendios forestales en España. Barcelona: InvestigacionyCiencia.es
32. Muños-Alonso, Gemma (2011). Estructura, metodología y escritura del Trabajo de Fin de Máster. Madrid: Escolar y Mayo Editores S.L.
33. Nieto M. et al (2017). Delimitación y análisis del incendio forestal de Sierra de Gata (Cáceres) mediante imágenes de los satélites Landsat 8 y Sentinel 2. Sociedad Española de Ciencias Forestales. Plasencia, Cáceres, Universidad de Extremadura.
34. Nieto, A et al. (2013). Creación de un visor cartográfico para la gestión territorial y la promoción turística del geoparque de Sobrarbe. Universidad Autónoma de Madrid.
35. Oliva P.; Verdú F. (2008). Review of the use of several spectral indices and techniques to map burned area with MODIS images. Uned. Espacio, Tiempo y Forma. Serie VI, Nueva época. Geografía, nº1, 2008
36. Pereira J. et al. (1999). Regional-scale burnt area mapping in Southern Europe using NOAA-AVHRR 1 km data. En E. Chuvieco (Ed.), Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin. Springer-Verlag. Berlín.
37. Pinty, B. y Verstraete, M. M. (1992). "GEMI: a non-linear index to monitor global vegetation from satellites", Vegetatio 101, pp. 15-20.
38. Plan provincial de defensa contra incendios forestales Guadalajara, Incendios Forestales Castilla La Mancha (INFOCAM), 2021
39. Quignard, I et al. (2016). Aplicación de índices de área quemada en la cuenca del Río Gualeguay, Entre Ríos. Geotecnologías, Herramientas para la construcción de una nueva visión del cambio global y su transformación para un futuro sostenible.
40. Quintanilla, A et al. (2011). WizardgGIS, un asistente de generación de visores cartográficos personalizados, Instituto de Desarrollo Regional (IDR) UCLM y SIGTEL Geomática S.L., España.
41. Quintano, C. et al (2006). Mapping burned areas in Mediterranean countries using spectral mixture analysis from a uni-temporal perspective. International Journal of Remote Sensing, 27, 645–662.
42. Rodríguez Guitián, M. (2007). Clasificaciones climáticas aplicadas a Galicia: revisión desde una perspectiva biogeográfica. Universidad de Santiago de Compostela
43. Rouse J. et al. (1973). Monitoring vegetation system in the great plains with ETRS. En Third ERST Symposium. NASA.
44. Rumora, L. et al. (2020). Impact of various atmospheric corrections on sentinel-2 land cover classification accuracy using machine learning classifiers. ISPRS International Journal of Geo-Information. Faculty of Geodesy, University of Zagreb, Croatia.
45. Seco Granja, Rosa Almudena (2014). Aplicación de un Sistema de Información Geográfica al análisis de los datos de incendios forestales en España. Proyecto Final de carrera. Madrid: Universidad Politécnica de Madrid.
46. Ulibarry, Paco González (2017). Impacto de los incendios forestales en suelo, agua, vegetación y fauna. Biblioteca del Congreso Nacional de Chile
47. Yepes Temiño, Jorge (2002). Geomorfología de un sector comprendido entre las provincias de Lugo y Ourense (Galicia, Macizo Hespérico). Seminario de Estudios Galegos. Área de Xeoloxía e Minería.

Páginas web

1. CNIG, España a Través de los mapas <http://www.ign.es/espmap/index.htm>
2. Datos Climáticos de Galicia <https://es.climate-data.org/europe/espana/galicia-241/>
3. Enciclopedia Libre Universal en español
[http://enciclopedia.us.es/index.php/Geografía física de Galicia](http://enciclopedia.us.es/index.php/Geografía_física_de_Galicia)
4. Estadística de los incendios forestales, Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico
https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/estadisticas/Incendios_default.aspx
5. Formación de ArcGIS <https://learn-arcgis-learnngis.hub.arcgis.com/>
6. Global Wildfire Information System (GWIS)
<https://gwis.jrc.ec.europa.eu/apps/country.profile/maps>
7. Instituto Gallego de Estadística <https://www.ige.eu/>
8. Mapa de ocupación del suelo en Galicia
<http://mapas.xunta.gal/visores/ocupaciondosolo/?locale=es>
9. Ministerio del Interior, Dirección General de Protección Civil y Emergencias
<https://www.proteccioncivil.es/documentacion/informes>
10. PLADIGA 2017
<https://praza.gal/storage/xornal/uploads/arquivos/arquivo/5a0427bebf780-pladiga2017.pdf>
11. Sentinel Explorer <https://sentinel2explorer.esri.com/>
12. Sentinel Hub Browser <https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/> -
13. Xunta de Galicia, centro de descargas <http://mapas.xunta.gal/centro-de-descargas>

ANEXOS

ANEXO I [FLUJO DE TRABAJO](#)

ANEXO II [AUTOMATIZACIÓN DEL PROCEDIMIENTO DEL ANÁLISIS DE LAS ÁREA QUEMADAS CON MODEL BUILDER](#)

ANEXO III [CARTOGRAFÍA DE LAS ÁREAS QUEMADAS](#)