

Artículo de investigación

Índice de riesgo de ocurrencia de incendios: una modificación del índice desarrollado por el ICONA en Galicia

Wildfire risk index: A modification of an index developed by ICONA in Galicia

Rodríguez Barreiro, M.¹; Novo Pérez, M.A.²; Vaamonde Rivas, M.¹;
Ginzo Villamayor, M.J.^{3*}; Pérez Porras, F.⁴

¹*Instituto Tecnológico de Matemática Industrial (ITMATI), Edificio Instituto Investigaciones Tecnológicas, planta -1. Rúa de Constantino Candeira s/n. Campus Vida. Santiago de Compostela Spain. C.P.15782.*
marta.rodriguez.barreiro@usc.es, manuel.vaamonde.rivas@usc.es

²*Universidade da Coruña, Facultad de Informática, Campus de Elviña s/n. A Coruña. Spain. C.P.15071*
manuel.antonio.novo.perez@udc.es

³*Departamento de Estadística, Análisis Matemático y Optimización, Universidad de Santiago de Compostela, Facultad de Matemática, Rúa Lope Gómez de Marzoa s/n. Campus Vida. Santiago de Compostela Spain CP.15782*
mariajose.ginzo@usc.es

⁴*Dpto. Ingeniería Gráfica y Geomática, ETSIAM, Universidad de Córdoba Córdoba, Spain. C.P.14071*
o12pepof@uco.es

* Autor de correspondencia Tel.: (+34) 881 8131378 Ext 13378
Correo electrónico: mariajose.ginzo@usc.es

Resumen

Conocer el riesgo de que se produzca un incendio en un área determinada es clave para llevar a cabo labores de prevención y de gestión de operativos de extinción. La dificultad de conocer este riesgo reside en las características particulares de cada lugar de la geografía, ya que un mismo índice de riesgo puede no tener la misma bondad en diferentes regiones. Debido a esto, se ha desarrollado un índice para Galicia capaz de adaptarse fácilmente a otros puntos de la geografía española. Se basa en un índice ya existente desarrollado por el ICONA al que se añade una modificación que tiene en cuenta la recurrencia de incendios. Se calculan los pesos para ambos subíndices, ICONA y recurrencia, que conforman el nuevo índice a partir de máquinas de soporte vectorial. Se comprueba que en Galicia el valor de riesgo aportado por el nuevo índice es mayor que el ofrecido por el ICONA.

Palabras clave: *incendio forestal, recurrencia, toma de decisiones, índice meteorológico, incendios históricos.*

Abstract

Knowing the risk of a forest fire occurring in a given area is key to carrying out prevention and management of fire extinguishing operations. The difficulty of knowing this risk lies in the particular characteristics of each geographical place, since the same risk index may not have the same validity in different regions. Due to this, a risk index for Galicia capable of adapting to different parts of the geography of Spain has been developed. It is based on an existing risk index developed by ICONA to which a modification has been added which takes into account the recurrence of forest fires. The weights for both sub-indices, ICONA, and recurrence, that make up the new index are calculated from support vector machines. In Galicia, the risk value provided by the new index is found to be higher than that provided by ICONA.

Palabras clave: *Wildfires, recurrence, make decisions, meteorological index, historical wildfires.*

1. Introducción

Los incendios forestales son uno de los grandes problemas medioambientales, sociales y económicos a los que se enfrenta la humanidad en la actualidad. En Europa, se estima que 400000 hectáreas han sido quemadas en el año 2019, de las cuales aproximadamente un 48% pertenecen a la red natural protegida Natura2000 (JRC Technical Report, 2019). Debido a esto, son muchos los esfuerzos que se están llevando a cabo para mejorar las tareas de prevención y extinción de incendios.

Conocer el riesgo de que se produzca un incendio en una zona y un momento concretos es importante para planificar actividades de prevención y asignar recursos (Dentoni y Muñoz, 2012). El reto se encuentra en desarrollar un mecanismo que permita reflejar el riesgo de que se produzca un incendio para la ayuda a la toma de decisiones, y que sea lo suficientemente sencillo para poder ser utilizado en la práctica sin grandes complicaciones (Resco and Nolan, 2021). En la literatura existen diversos índices que indican el riesgo de que se produzca un incendio o se propague rápidamente. Entre los índices más sencillos se pueden destacar los índices de Nesterov (Onderka and Melichercik, 2009; de Groot *et al.*, 2014) y de Tellysin (Prado, 2014) desarrollados en la antigua Unión Soviética. Ambos son índices acumulativos que se calculan a partir del déficit de saturación del aire y la temperatura ambiente, y del punto de rocío y la temperatura del aire, respectivamente. Para los ecosistemas húmedos del sudeste de Brasil se desarrolló la Fórmula de Monte Alegre (Pereira *et al.*, 2017) que se calcula a partir de la humedad relativa e incluye una corrección cuando aparecen precipitaciones. También existen sistemas compuestos por varios índices, como el Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales (de Groot *et al.*, 2007; de Groot *et al.*, 2014). Este índice, que se desarrolla en Canadá, se compone de dos subíndices, el *Fire Weather Index* (FWI) basado en la humedad relativa, temperatura, velocidad del viento y lluvia (Van Wagner, 1987); y el *Canadian Forest Fire Behavior Prediction* (FBP) que provee estimaciones cuantitativas del comportamiento del incendio (Forestry Canada Fire Danger Group, 1992). En Estados Unidos se desarrolla el *National Fire-Danger Rating System* (NFDRS, Mölders, 2010; de Groot *et al.*, 2014), compuesto de tres subíndices que se combinan para dar lugar al índice de carga de fuego, el *Fire Load Index* (FLI, Bradshaw *et al.*, 1983). El índice *McArthur Forest Fire Danger Index* (FFDI) se desarrolla en Australia y se compone de subíndices que reflejan la probabilidad de que se inicie un incendio, la velocidad de propagación de este y las dificultades para su extinción (Dowdy *et al.*, 2009; de Groot *et al.*, 2014). En España, el Instituto para la Conservación de la Naturaleza (ICONA) desarrolló un índice de riesgo (de Vicente, 2012) basado en el NFDRS, que establece el peligro de que se produzca un incendio a partir de la humedad de combustible fino muerto y calcula su velocidad de propagación utilizando la velocidad del viento. A lo largo de este trabajo se hará referencia a este índice como índice ICONA.

Todos los índices existentes se adecúan a las condiciones de la zona para la que han sido desarrollados, aunque también pueden ser utilizados en otras áreas con características similares. Por ejemplo, el Sistema Canadiense de Evaluación de Peligro de Incendios Forestales se utiliza ampliamente en Europa (European Forest Fire

Information System, EFFIS), y en ciertas regiones como Alaska, o países como Fiji y Nueva Zelanda. Sin embargo, utilizar un sistema de evaluación de peligro que no se ajuste al ecosistema al que se aplica puede llevar a la toma de decisiones inadecuadas (Dentoni y Muñoz, 2012). La finalidad de este trabajo es desarrollar un índice que indique el riesgo de que se produzca un incendio, sin tener en cuenta su tamaño, adaptado a un área concreta de la geografía española correspondiente con la Comunidad de Galicia.

La intervención humana, factor de riesgo en el origen de incendios, hace que, en determinadas regiones como Galicia, ocurran incendios de forma recurrente. En esta región de España los incendios forestales están relacionados con factores socioeconómicos y naturales o medioambientales (Diego *et al.*, 2020). Considerar este riesgo antrópico es importante para mejorar la precisión del índice a desarrollar (Farfán *et al.*, 2018). Para ello, en el índice propuesto se aplica una modificación basada en la recurrencia de incendios a un índice calculado a partir de variables meteorológicas. El hecho de añadir el histórico de los incendios permite detectar factores relacionados con el comportamiento humano que son difíciles de detectar de otra forma (de Vicente, 2012; de Vicente and Crespo, 2012). Además, también permite identificar diferencias en el riesgo de que ocurra un incendio dentro de la misma región, destacando las zonas con problemas estructurales, ya sea por orografía de la zona o por factores antrópicos relacionados, como la densidad poblacional (Castedo-Dorado *et al.*, 2007; Senra *et al.*, 2018; Fernandes, 2019). Seidl *et al.* (2011) destacan que en los últimos años cada vez más modelos predicen la ocurrencia de un incendio basándose en interacciones entre el clima, la vegetación y el impacto humano.

En su libro, Vélez (2000) menciona la importancia de incorporar la recurrencia de incendios en un sistema de predicción del peligro de incendios forestales. Según el autor, este sistema debe estar compuesto por dos índices, que a su vez se componen de otros subíndices. Entre éstos, menciona el riesgo local de peligro para un territorio determinado, que se obtiene a partir de la frecuencia media de incendios, la frecuencia de incendios en función de las causas que los originan, y las características de las asociaciones vegetales presentes. El índice basado en la recurrencia que se desarrolla en este trabajo tiene un componente análogo a este riesgo local. La causalidad se omite por falta de datos sobre las causas que originan los incendios. En cuanto al componente de combustibilidad, no se incorpora tal y como lo describe el autor, pero se añade un componente que contempla el tipo de superficie quemada en los incendios ocurridos.

Senra *et al.* (2018) también utilizan un componente de riesgo histórico para la elaboración del índice de riesgo. En su Plan de Emergencia Ante el Riesgo de Incendios Forestales en Andalucía (PLEIF) construyen un subíndice histórico de forma similar a la propuesta en este trabajo, utilizando únicamente incendios mayores a 100 ha ocurridos en un periodo de 15 años. Dada la casuística de Galicia, con muchos incendios de pequeño tamaño, en este trabajo se han escogido todos los incendios originados en los últimos 5 años, independientemente de su tamaño. La elección de este periodo se debe a que se ha observado que la tendencia de los incendios varía en periodos de tiempo más grandes. Según los datos recogidos en el trabajo de Cubo

et al. (2012) el número de incendios forestales ocurridos en Galicia en el decenio 2001-2010 es de 72423, de los cuales sólo 68 han sido grandes incendios (tamaño superior a 500 ha).

El índice propuesto consiste en aplicar una modificación de un índice calculado a partir de las condiciones meteorológicas mediante la creación de otro índice basado en la recurrencia de incendios. En Galicia se registran incendios en zonas concretas de forma recurrente, como se puede ver en la *Fig. 1*. En esta imagen pueden verse dos mapas de calor de los incendios ocurridos entre los años 2015 y 2019 en Galicia y en la Comunidad de Aragón, que nos permite destacar cómo en Galicia los incendios suceden en las mismas zonas de forma recurrente frente a la dispersión de los incendios en Aragón, en donde se distribuyen por todo el territorio. Los datos de los incendios han sido obtenidos del servicio The Fire Information for Resource Management System (FIRMS) que proporciona la NASA (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/map/#d:24hrs;@0.0,0.0,3z>). Todos los incendios tienen una superficie quemada mayor o igual a 6 ha, ya que son los incendios recogidos en este servicio.

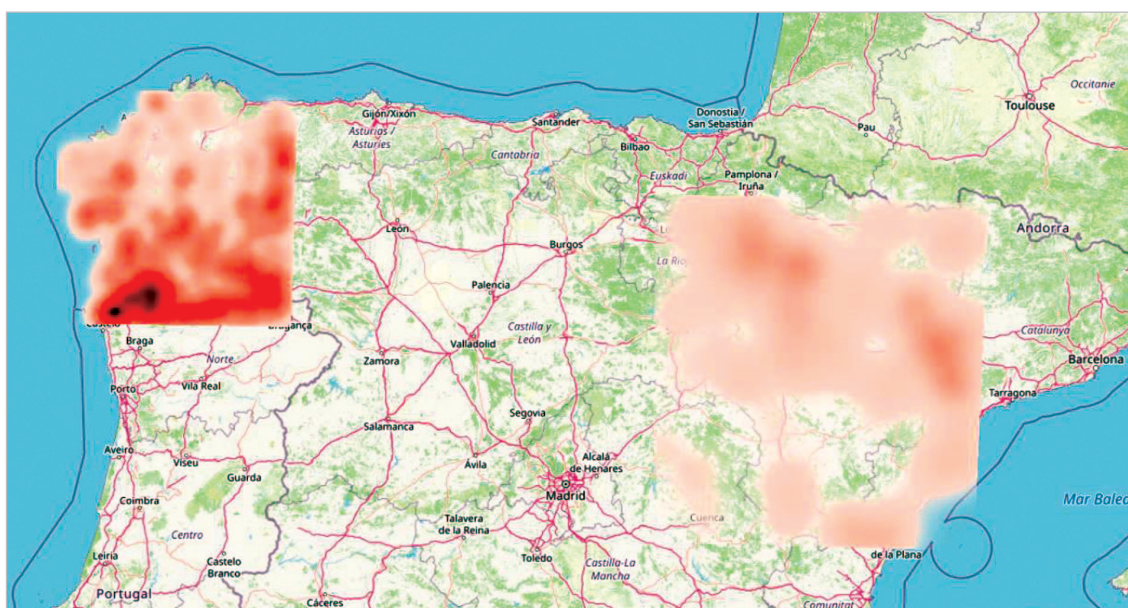


Figura 1. Mapas de calor de los incendios ocurridos en Galicia y Aragón. Los colores rojos más intensos indican un mayor número de incendios.

En la *Fig. 1* se puede observar que en Galicia hay zonas con una recurrencia alta de incendios, sobre todo en la parte sur, mientras que en la Comunidad de Aragón la distribución es dispersa. Según el último informe del Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación (2019) del decenio 2006-2015, el 68.6% de los incendios en la región noroeste de España son intencionados, frente al 31.47% de la región mediterránea o el 35.22% de las comunidades interiores.

En España, existen diferentes índices de riesgo además del desarrollado por el ICONA mencionado anteriormente. Por ejemplo, el Índice de Riesgo Diario de In-

ceñidos (IRDI) utilizado por la Consellería de Medio Rural de la Xunta de Galicia (Consellería do Medio Rural, 2020); y el Índice de Peligrosidad de Incendios Forestales en el Levante Español (Franco *et al.*, 2019) utilizado en la Comunidad Valenciana. Para este trabajo, se escoge el índice ICONA como base por ser un índice ampliamente usado en España desde su creación (Sánchez *et al.*, 2018). En Sánchez *et al.* (2018), los autores también utilizan el índice ICONA como índice de referencia para obtener la probabilidad de ignición en una región concreta de Cáceres, combinándolo con las imágenes que proporcionan el Sentinel 2 y datos de tipo Light Detection and Ranging (LiDAR) (Chuvieco *et al.* (2010)).

El objetivo de este trabajo es desarrollar un índice que mejore al creado por el ICONA para su aplicación en Galicia, teniendo en cuenta la recurrencia de incendios en esta región, sus características sociales y geográficas, utilizando la información histórica de los incendios ya ocurridos.

2. Material y métodos

Como se ha mencionado en la introducción, existen una gran variedad de índices de riesgo, todos ellos de distinta complejidad e indicando distintos aspectos del peligro. El índice propuesto, destinado a identificar el riesgo de que se inicie un incendio, se compone de dos subíndices, el subíndice ICONA y el subíndice basado en la recurrencia de incendios.

2.1. Índice de Riesgo de Incendios desarrollado por el ICONA.

El índice ICONA es un sistema compuesto por el riesgo de que se produzca un incendio y por la probabilidad de que este se propague rápidamente. Para el índice propuesto, como se pretende calcular el riesgo de que se inicie un incendio, se utiliza únicamente el componente del índice ICONA que refleja este riesgo.

Para calcular el riesgo de que se inicie un incendio, el índice ICONA calcula la humedad del combustible fino muerto a partir de unos valores tabulados (Ministerio del Medio Ambiente). De la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) se obtienen datos de los valores de temperatura ambiente y humedad relativa de las estaciones correspondientes a la región, y se interpolan a toda la cuadrícula del territorio utilizando la función *MeteorologyInterpolationData* del paquete *meteoland* (de Cáceres *et al.*, 2018) del software estadístico R (R Core Team, 2019). A partir de estos valores de temperatura ambiente y humedad relativa se obtiene el valor de la humedad básica del combustible. A este se le aplica, para obtener la humedad del combustible fino muerto, una corrección en función de la pendiente, orientación, sombreado del terreno y la hora y el mes para la que se está calculando el índice. Los valores de pendiente, orientación y sombreado del terreno se pueden obtener del Centro de Descargas del Organismo Autónomo Centro Nacional de Información Geográfica (CNIG; <http://centrodedescargas.cnig.es/CentroDescargas/catalogo.do?Serie=LIDAR#>). El terreno se considera sombreado a partir del 50% de fracción de cubierta cubierta.

Los valores del índice ICONA varían entre 1 y 18, donde los valores más bajos representan un riesgo mayor de que se inicie un incendio.

2.2. Índice de Riesgo Basado en la Recurrencia de Incendios.

Para calcular el subíndice basado en la recurrencia de incendios se lleva a cabo un procedimiento análogo al que se plantea en el plan contra incendios forestales de las Islas Baleares (Govern de les Illes Balears, 2015), con pequeñas modificaciones. Para calcular el índice se tiene en cuenta la frecuencia de incendios ocurridos y la gravedad de los mismos, en función del terreno quemado. Esto se realiza obteniendo un indicador entre 1 y 17 para cada uno de estos factores.

En primer lugar, la frecuencia de incendios se calcula del siguiente modo: Se divide la superficie para la que se va a calcular el mapa de riesgo en una cuadrícula con una resolución de 10 km.

1. Para cada celda se calcula cuántos incendios han ocurrido en los últimos 5 años.
2. Se calculan los 17 cuantiles del rango de número de incendios obtenidos, omitiendo las celdas en las que no ha ocurrido ningún incendio.
3. Se asigna un valor entre 1 y 17 a cada celda en función del cuantil al que pertenece, asignando al cuantil más bajo el valor más alto.

Para el cálculo del indicador de gravedad se dividen los incendios sucedidos en función de la superficie en la que ocurrieron, categorizada en tres grandes grupos: superficie arbolada (Sfa), superficie no arbolada ($Sfna$) y superficie no forestal (Snf). Se divide la superficie de interés en una cuadrícula de una resolución de 10 km.

1. Para cada celda, se cuenta el número de incendios ocurridos en cada uno de los tipos de superficie mencionados.
2. Se hace una suma ponderada entre estas tres cantidades para calcular la gravedad (G):

$$G = \frac{1.5Sfa + 1.25Sfna + Snf}{Sfa + Sfna + Snf}$$

La selección de los pesos se basa en el índice creado para las Islas Baleares (Govern de les Illes Balears, 2015).

3. Se calculan los 17 cuantiles del rango de valores obtenidos de G , y se le asigna a cada celda un peso, entre 1 y 17, en función del cuantil en el que se encuentre el valor de G de dicha celda.

Finalmente, para calcular el subíndice de riesgo basado en la recurrencia de incendios, se suman los dos valores calculados de cada celda, y se les asigna un valor de acuerdo a la *Tab. 1*.

Tabla 1. Valores asignados al índice de peligro basado en la recurrencia de incendios.

Suma de los valores	2	3-4	5-6	7-8	9-10	11-12	13-14	15-16	17-18	19-20	21-22	23-24	25-26	27-28	29-30	31-32	33-34
Codificación	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17

Así, se obtiene un valor entre 1 y 17 en el que los valores más bajos indican un riesgo más alto de incendio.

2.3. Índice de Riesgo Final.

La estructura del índice desarrollado en este trabajo puede verse en la *Fig 2*.

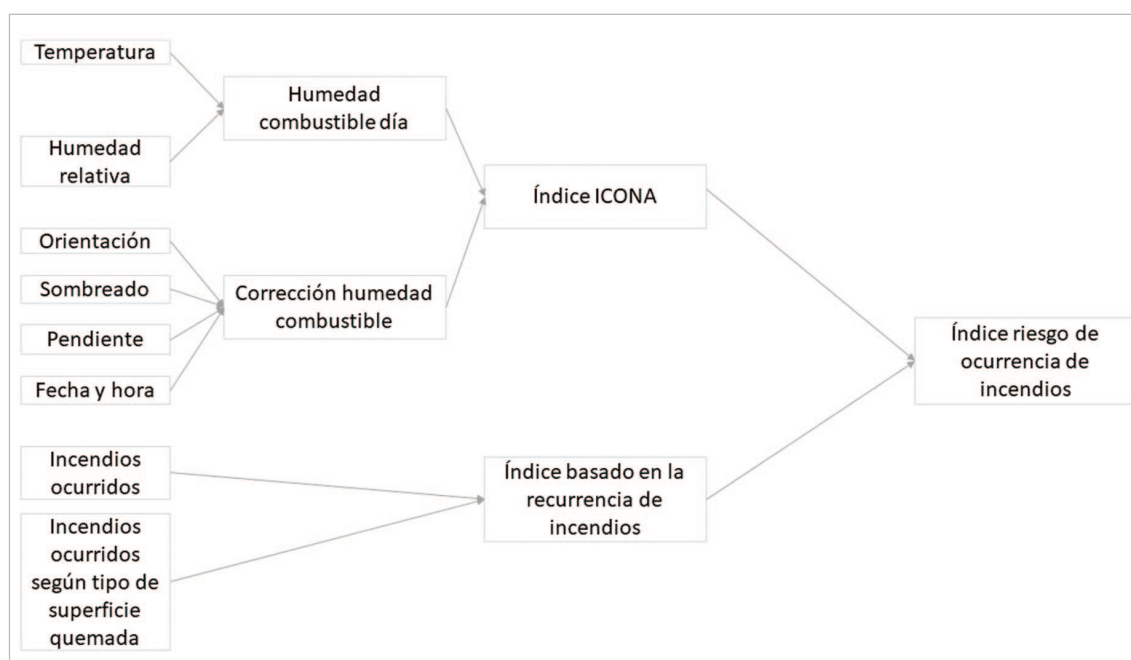


Figura 2. Esquema del índice propuesto.

Como se observa en la figura, para obtener el índice de riesgo final se realiza una suma ponderada de los índices previamente definidos, asignando los pesos en función de la región para la que se calcula el riesgo, como se muestra en la siguiente fórmula:

$$ind = w_1 ind_1 + w_2 ind_2,$$

donde w_1 y w_2 son los pesos asignados a cada uno de los subíndices, e ind_1 e ind_2 re-

presentan los valores del índice ICONA y el basado en la recurrencia de incendios, respectivamente.

En el PLEIF (Senra *et al.*, 2018) también utilizan una combinación lineal para integrar los dos subíndices desarrollados. En su caso, en vez del índice ICONA, utilizan un índice de elaboración propia que también se basa en el peligro estructural y meteorológico. La ventaja de escoger un índice ya desarrollado, como el ICONA, es que facilita las tareas de validación. Además, como es un índice de cálculo rápido, permite que el índice final pueda calcularse varias veces al día utilizando una gran resolución.

2.4. Validación del índice de riesgo de incendios desarrollado.

Una vez desarrollado el índice de riesgo de incendios, éste no puede darse por finalizado mientras no se someta a un proceso de validación rigurosa, que deje patente la relación entre el índice y la existencia del incendio (de Vicente, 2012).

El proceso de validación al que se somete el índice consiste en dos partes bien diferenciadas. En primer lugar, se comprueba que los valores del índice en el momento en el que existe un incendio son significativamente menores que en las zonas en las que no lo hay. Para esto se utiliza el T-test (Vélez y García, 1993) para dos muestras independientes. La falta de normalidad de las muestras se subsana con el tamaño muestral, que es lo suficientemente grande como para poder aplicar el T-test con buenos resultados. Para asegurar esto, se utiliza también el Mann-Whitney-Wilcoxon test (Vélez y García, 1993), la alternativa no paramétrica al T-test.

A continuación, se utiliza un Support Vector Machine (SVM, Burbidge and Buxton, 2001) para estudiar la bondad de las predicciones de existencia de incendio a partir de las diferentes combinaciones de pesos escogidas. El SVM se aplica como un método de clasificación binaria. La variable respuesta del modelo será la existencia o no de incendio, y la variable explicativa el valor del índice de riesgo calculado para esa celda. En el caso de los incendios, hay muchas más zonas en las que no hay incendio que en las que sí. Debido a esto, se asignan unos pesos que permiten balancear las clases según el tamaño muestral, evitando que el algoritmo clasifique todas las entradas como “No Incendio” (se debe tener en cuenta que cuando se entrena el modelo, la respuesta será “No Incendio” muchas más veces que “Incendio”, si no se balancean las clases como se ha indicado con los pesos, el algoritmo devolverá “No Incendio” sea cual sea la entrada).

Para analizar los resultados obtenidos del SVM se estudian las matrices de confusión y se aplica el F-Score (Skolova *et al.*, 2006), que permite resumir la precisión y la sensibilidad del modelo, y es muy útil cuando la distribución de las clases es desbalanceada y el foco está en la clase minoritaria.

Por último, se comprueba que el índice de riesgo indicaba un nivel alto de riesgo cuando se produjeron los incendios entre julio y agosto del año 2020 en Galicia.

Analizar la validez de un índice de riesgo de incendios es muy complejo ya que un riesgo alto no significa necesariamente que el incendio ocurra. Además, cuando se comparan regiones en las que no hay incendios y en las que sí, el número de regiones sin incendios siempre es mucho mayor que las regiones en las que éstos su-

ceden. Para facilitar la validación del índice desarrollado, se comprueba si los resultados obtenidos mejoran los del índice ICONA, utilizado en España desde su creación (Sánchez *et al.*, 2018) y por tanto validado empíricamente.

2.5. Algoritmo desarrollado y tiempos de ejecución.

El algoritmo desarrollado se ha programado en el lenguaje R (R Core Team, 2019). Este algoritmo permite obtener seis mapas diarios que reflejan el riesgo de que se produzca un incendio en el momento de su ejecución. Recibe como datos de entrada los pesos que se asignan a cada uno de los subíndices que conforman el índice final; un modelo digital del terreno (MDT) de la región para la que se calculará el mapa; información de los incendios ocurridos en la zona; y un mapa con el sombreado del terreno de la zona correspondiente, como el que proporciona el Sistema de Información sobre Ocupación del Suelo de España (SIOSE). La resolución del MDT introducido determina la resolución del mapa final.

En la *Tab. 2* se tiene los tiempos de computación obtenidos al ejecutar el algoritmo.

Tabla 2. Tiempos de ejecución del algoritmo.

	Resolución 25 metros		Resolución 200 metros		Descarga datos meteorológicos
	Completa	Parcial	Completa	Parcial	
PC 1	31 min	27 min	18 min	18 min	16 min
PC 2	29 min	24 min	19 min	18 min	17 min

El PC 1 tiene un procesador Intel® Xeon® Gold 6126, 12 núcleos por procesador y 384 GB de RAM; mientras que PC 2 se trata de un ordenador con un procesador Intel® Core™ i7-8565U CPU @ 1.80 GHz, 1.99 GHz con 4 núcleos (8 procesadores lógicos) y 16 GB RAM (*Tab. 2*).

Se realizan ejecuciones con dos resoluciones distintas, para mostrar cómo afectan éstas a los tiempos de ejecución. Para cada una de las resoluciones, se muestran los tiempos para dos tipos de ejecución, total y parcial. La ejecución total es el cálculo de todos los componentes del índice de riesgo desarrollado. En la ejecución parcial no se calcula el subíndice de recurrencia de incendios. Como este subíndice es invariante durante todo el año, es suficiente calcularlo anualmente, y en las sucesivas ejecuciones el algoritmo se limita a leer el valor del índice calculado, calculando únicamente el índice ICONA. Este tipo de ejecuciones son las que se denominan en la *Tab. 3* ejecuciones parciales.

Se incorporan también los tiempos de descarga de los datos meteorológicos, necesarios para la obtención del índice ICONA, que tienen gran influencia sobre los tiempos finales de ejecución.

Se utiliza la aplicación QGIS (QGIS.org, 2021) para la visualización de los resultados. Los resultados presentados en la siguiente sección, en concreto las *Fig. 7* y *8* están representados con ayuda de esta aplicación.

3. Resultados

3.1. Índice de Riesgo Basado en la Recurrencia de Incendios.

A continuación, se muestran los pasos que se han seguido para calcular el índice basado en la recurrencia en Galicia para el año 2020, para lo que se han empleado los incendios ocurridos en esta región entre los años 2015 y 2019.

1. Se dividió la superficie de Galicia en una cuadrícula con una resolución de 10 km.
2. Se calculó cuántos incendios se produjeron en cada una de las celdas obteniendo valores entre 0 (en la mayoría de las celdas no se ha producido ningún incendio) y 55. Los incendios estudiados fueron todos los que tuvieron presencia de medios aéreos, ya fuesen clasificados como conato, incendio o gran incendio forestal.
3. Se calcularon los cuantiles de la distribución de incendios ignorando las celdas con valor nulo. Se obtuvo que entre el primer y el segundo cuantil estaban las celdas con un único incendio, entre el tercero y el quinto las celdas con 2 incendios, y así sucesivamente hasta llegar al cuantil 17, que correspondía a la celda que tenía 55 incendios.
4. A las celdas sin incendio se les asignó el peso 17, las que tenían un número de incendios igual al del primer cuantil el peso 16, y así sucesivamente. A las celdas con un incendio, que pertenecían a los dos primeros cuantiles, se les asignó la media de los pesos que correspondían, es decir, 15.5. Esto se repitió para todos los valores hasta llegar a la celda con 55 incendios a la que se le asignó el valor 1.

El siguiente paso fue calcular el factor relacionado con la gravedad de los incendios.

1. Se dividió la superficie de Galicia en una cuadrícula con una resolución de 10 km.
2. Se calculó el número de incendios ocurridos en cada celda en cada tipo de superficie. Se obtuvieron valores entre 0 y 48 en los incendios de superficie forestal arbolada; entre 0 y 14 para la superficie forestal no arbolada; y valores entre 0 y 3 para los incendios en superficie no forestal.
3. Se hizo una suma ponderada en los valores de cada celda, de acuerdo con la fórmula explicada en la sección anterior. Para cada celda se obtuvo un único valor entre 0 y 1.5.

4. Se calcularon los cuantiles de esta distribución de valores ignorando las celdas con valor nulo. Se obtuvo que en el primer cuantil estaban las celdas con un valor de gravedad correspondiente a 1.32, en el segundo las celdas con un valor hasta 1.375, y así hasta llegar al cuantil 9, que se correspondía con el 62.5% de los datos, a partir del cual estaban todas las celdas que tenían un valor superior a 1.48.
5. A las celdas con un valor de gravedad igual a 0 se les asignó el peso 17, a las que tenían un valor entre 0 y 1.32 se les asignó el peso 16; a las que tenían un valor entre 1.32 y 1.375 se les asignó el peso 15, y así sucesivamente. A las celdas con un valor superior a 1.48, como pertenecían a varios cuantiles, se les asignó la media de los pesos que le correspondían, el peso 4.5.

De esta forma se obtuvo para cada celda un valor entre 1 y 17 que identificaba la frecuencia de incendios, y otro valor, que en este caso variaba entre 4.5 y 17, que identificaba la gravedad de dichos incendios en función de la superficie quemada. El último paso para obtener el índice basado en la recurrencia fue sumar estos dos valores y asignar un valor entre 1 y 17 en función del valor de la suma obtenida, que variaba entre 5.5 y 34. Los pesos 1, 2 y 3 se correspondieron con las celdas que tenían un valor de la suma igual a 1, entre 1 y 3, y entre 3 y 5, respectivamente. Como los valores de las celdas nunca eran inferiores a 5.5, el primero de los pesos asignados fue el valor 4, correspondiente a las celdas cuya suma variaba entre 5.5 y 7. A las celdas con un valor entre 7 y 9 se les asignó el peso 5; y a las que tenían un valor entre 9 y 11 se les asignó el valor 6. Así sucesivamente hasta llegar a las celdas con un valor superior a 31, a las que se les asignó el valor 17.

3.1. Validación del índice propuesto.

En el proceso de validación, se realizó un análisis para comprobar si los valores del índice desarrollado eran menores en las zonas en las que se producía un incendio. Para llevarlo a cabo, se seleccionó una muestra de 60 días en los que existía al menos un incendio en Galicia con una superficie quemada de al menos 6 ha entre los años 2015 y 2019, y se dividió la región en una malla con una resolución de 10 km. Se escogieron los incendios con un tamaño igual o superior a 6 ha porque son los proporcionados por la NASA en el FIRMS, pero el índice está diseñado para introducir todos los incendios existentes independientemente de su tamaño. A continuación, se escogieron diferentes combinaciones de pesos asignados a los subíndices: $w_1 = 1$ y $w_2 = 0$; $w_1 = 0.85$ y $w_2 = 0.15$; $w_1 = 0.75$ y $w_2 = 0.25$; $w_1 = 0.5$ y $w_2 = 0.5$; $w_1 = 0.25$ y $w_2 = 0.75$; en donde w_1 correspondía al peso asignado al subíndice ICONA y w_2 correspondía al peso asignado al subíndice basado en la recurrencia de incendios.

Para cada celda de la región, se extrajo el valor de cada una de las combinaciones de índices. En el caso de que en una celda hubiese más de un valor (ya que el índice se calculó en una resolución de 200 m) se escogió el más bajo de todos los obtenidos. De este modo, para cada celda de la malla se tenía un valor de cada una

de las combinaciones de los índices de riesgo. Esto se hizo para cada una de las 60 fechas seleccionadas. A continuación, se examinó en cada fecha en qué celdas hubo incendio, y se compararon los valores de los índices cuando había incendio y cuando no. El resultado obtenido puede verse en la *Fig. 3*.

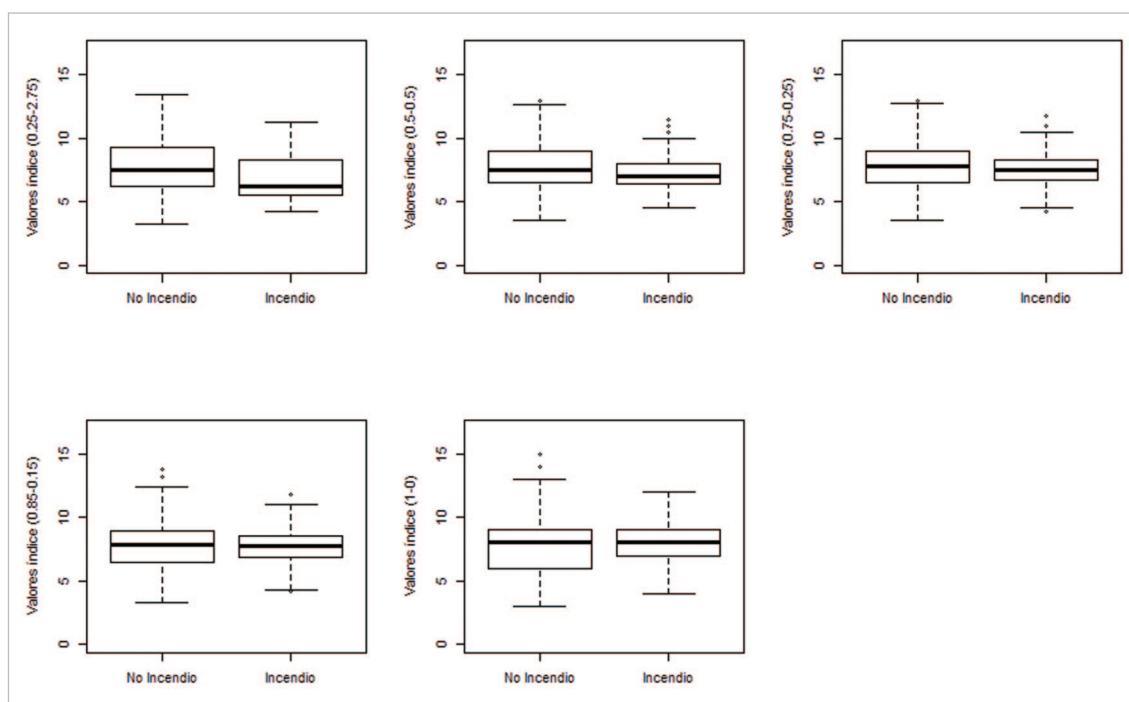


Figura 3. Boxplot de los valores del índice en las celdas en las que no hay incendio (*izquierda*) y en las que sí (*derecha*) de las distintas combinaciones de pesos de los subíndices ($w_1 = 0.25$ y $w_2 = 0.75$; $w_1 = 0.5$ y $w_2 = 0.5$; $w_1 = 0.75$ y $w_2 = 0.25$; $w_1 = 0.85$ y $w_2 = 0.15$; $w_1 = 1$ y $w_2 = 0$).

Si el índice tenía un comportamiento correcto, era esperable que los valores cuando había incendio fuesen más bajos que cuando no había. En general, en los diagramas de cajas puede apreciarse que los valores fueron más bajos cuando había incendio, aunque estas diferencias variasen en función de la combinación de índices escogida.

Se aplicaron el T-test y el Mann-Whitney-Wilcoxon test para observar si las diferencias observadas eran significativas. En la *Tab. 3* se muestran los p-valores obtenidos para las diferentes combinaciones de índices, con cada uno de los test aplicados:

Tabla 3. p-valor obtenido en el T-test para las diferentes combinaciones de pesos en los dos test aplicados.

Combinación (icono-recurrencia de incendios)	1-0	0.85-0.15	0.75-0.25	0.5-0.5	0.25-0.75
p-valor (T-test)	0.9599	0.3708	0.02739	<0.001	<0.001
p-valor (Mann-Whitney-Wilcoxon test)	0.9446	0.2712	0.03709	<0.001	<0.001

Puede observarse que los resultados de ambos test fueron similares, ya que ambos rechazaban la hipótesis nula para las mismas combinaciones de índices y señalaban diferencias significativas en las combinaciones en las que el índice ICONA tenía un peso igual o menor a 0.75.

A la vista de los resultados, se decidió que el índice desarrollado en el que se combinaba el índice ICONA con el de la recurrencia podía proporcionar mejores resultados en Galicia que aplicar únicamente el ICONA (que se correspondía con la combinación 1-0).

Para decidir cuál de todas las combinaciones propuestas proporcionaba mejores resultados, dado que algunas tenían el mismo nivel de significancia, se entrenó un SVM para cada una de las combinaciones de pesos, utilizando siempre la misma muestra de entrenamiento que consistía en un 80% de la muestra original. A continuación, con el 20% restante se probó cómo de buena era la clasificación. Cabía esperar que el algoritmo clasificase como “Incendio” muchos casos en los que realmente el incendio no había ocurrido, pues, aunque existiese un riesgo alto de que se produjese un incendio no quería decir que éste llegase a iniciarse. Para poder asumir que los resultados obtenidos eran buenos, se buscaba que el algoritmo no clasificase muchos “No Incendio” como “Incendio”, ya que esto querría decir que el índice siempre representaba un riesgo alto de incendio, y esto en la práctica no aportaba ningún tipo de información.

Se estudiaron las matrices de confusión y se aplicó el F-Score para analizar los resultados de aplicar el SVM. En la *Fig. 4* se muestran los valores del F-Score obtenidos para las diferentes combinaciones de pesos.

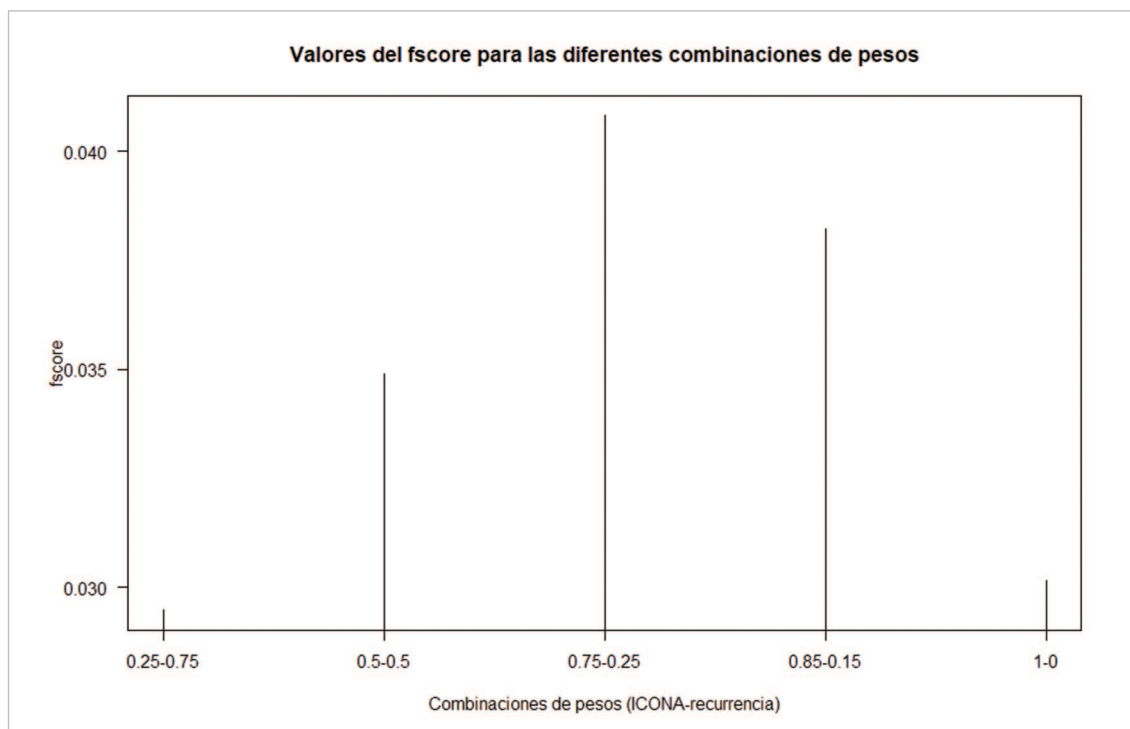


Figura 4. Valores del F-Score obtenidos al aplicar el SVM a las diferentes combinaciones de pesos.

Puede observarse que el mejor valor del F-Score se obtuvo para la combinación en la que el índice ICONA tenía un peso igual a 0.75. Esto permitió comprobar que el índice desarrollado mejoraba los resultados del índice ICONA en Galicia, que era el objetivo principal del análisis.

Además, este procedimiento permitió escoger entre las diferentes combinaciones de pesos propuestas la más precisa a efectos de predicción del riesgo de incendio. La combinación escogida para Galicia fue la que otorga un peso de 0.75 al índice ICONA y un 0.25 al índice de recurrencia.

Una vez que se decidió la combinación óptima de pesos para Galicia, se quiso probar la eficacia del índice con los incendios ocurridos durante los meses de julio y agosto del año 2020. Para ello, se calculó el índice desarrollado para cada día, y se clasificó el riesgo obtenido en cinco categorías: muy bajo (valor del índice superior a 13.8), bajo (valor del índice entre 10.6 y 13.8), medio (valor del índice entre 7.5 y 10.6), alto (valor del índice entre 4.2 y 7.5) y extremo (valor del índice menor o igual a 4.2). A continuación, se obtuvieron los incendios detectados en Galicia en los meses de julio y agosto, y se extrajo el nivel de riesgo calculado en la superficie y la fecha correspondiente al incendio. Dado que la resolución del mapa del índice de riesgo era de 200 metros, cuando se obtuvieron diferentes valores del índice se escogió el menor de todos.

En total, se encontraron 75 incendios en Galicia durante los meses de julio y agosto. En la *Fig. 5* puede verse el nivel de riesgo indicado por el índice cuando se produjeron los incendios.

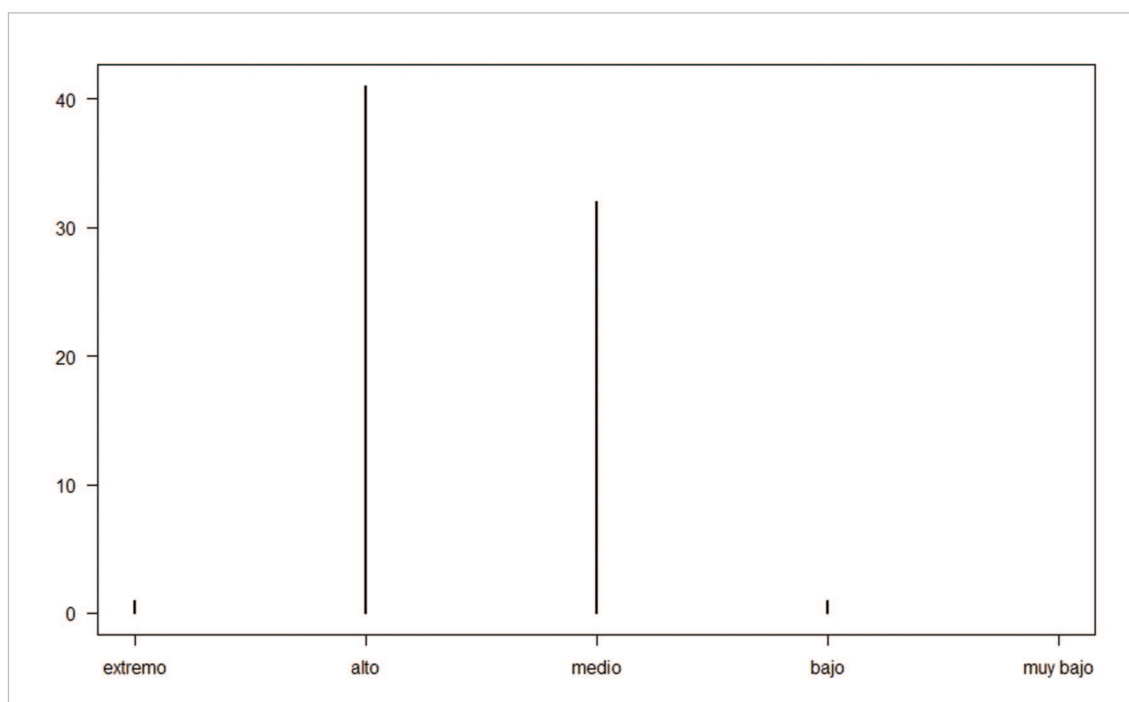


Figura 5. Riesgo indicado por el índice desarrollado durante los incendios de julio y agosto del 2020 en Galicia.

Como se puede apreciar en la *Fig. 5*, cuando se produjeron la mayor parte de los incendios el riesgo calculado era alto o medio. En concreto, el 56% de los incendios de julio y agosto ocurrieron cuando el índice desarrollado indicaba que había un nivel alto o extremo de riesgo de incendio.

El mismo estudio se repitió utilizando el índice ICONA. El resultado obtenido puede verse en la *Fig. 6*.

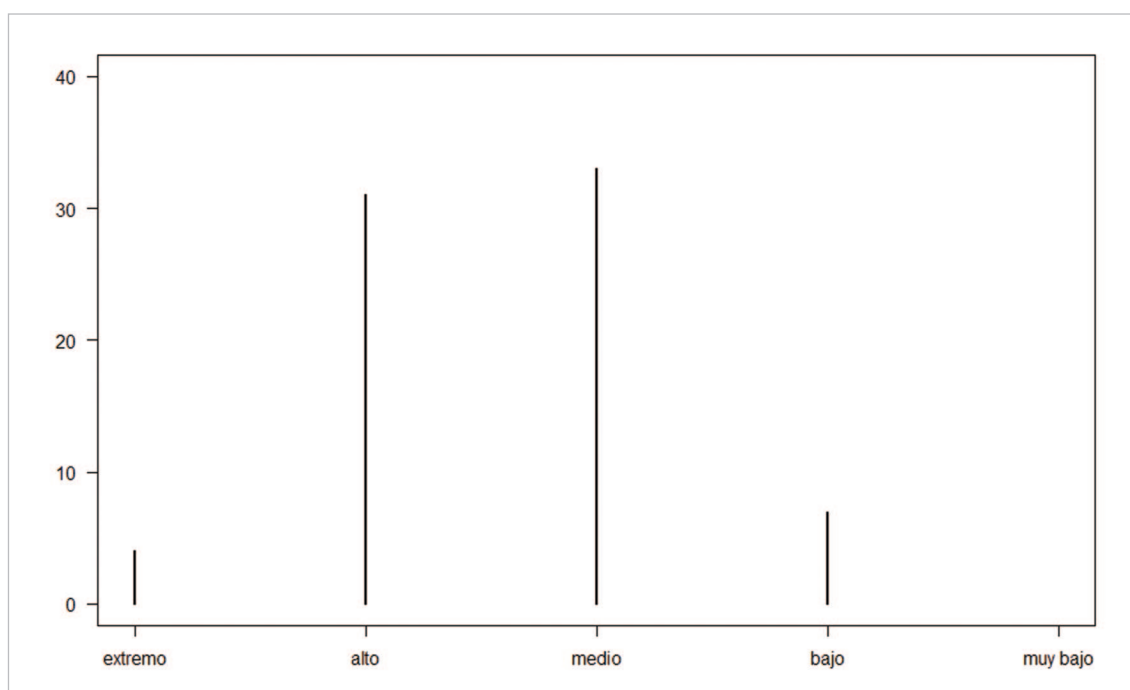


Figura 6. Riesgo indicado por el índice ICONA durante los incendios de julio y agosto del 2020 en Galicia.

En este caso, había un mayor número de incendios que se producían cuando el riesgo señalado por el índice era medio. El 47% de los incendios se produjeron cuando el riesgo de incendio era alto o extremo.

3.3 Ejemplos del índice de riesgo.

A continuación, se muestran unos ejemplos del índice de riesgo propuesto en Galicia.

En la *Fig. 7* puede verse el mapa de índice de riesgos en Galicia el 13 de agosto del 2020 a las 14 horas.

En la leyenda de la *Fig. 7* (en la izquierda superior) puede verse la escala de colores utilizada. Los colores rojos corresponden a los valores más bajos del índice, y por tanto más riesgo de incendio. En este caso puede verse un riesgo medio de incendios generalizado, con algunas zonas del sur de la provincia de Ourense y también de la costa oeste de Galicia con un riesgo más alto. La zona norte presenta el menor riesgo de incendios.

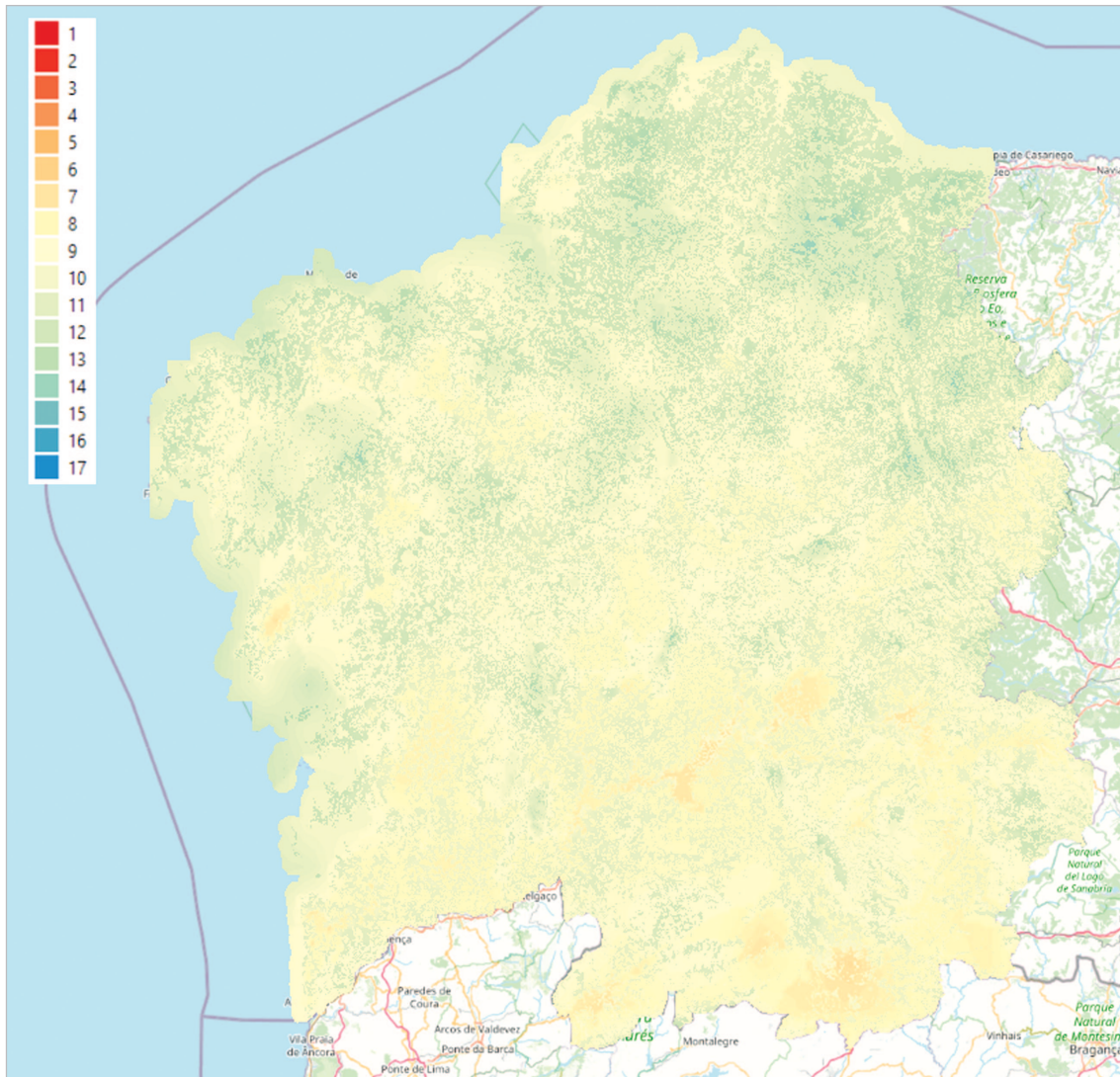


Figura 7. Mapa de riesgo con los valores del índice desarrollado en Galicia el 13-08-2020 a las 14:00 horas. Los colores azules indican menor riesgo de incendio (valor del índice igual a 17) y los colores rojos indican el riesgo de incendio extremo (valor del índice igual a 1).

En la *Fig. 8* puede verse el mapa de riesgo obtenido el 11 de noviembre del 2020 a las 10 de la mañana.

Respecto al mapa obtenido en agosto, en esta imagen se observan colores más azules y verdes, estos colores indican menor riesgo. En general el riesgo de incendio es bajo en toda Galicia, lo cual es coherente teniendo en cuenta la época del año en la que ha sido calculado.

4. Discusión

Las diferencias más representativas del índice de Riesgo de Incendio para Ga-

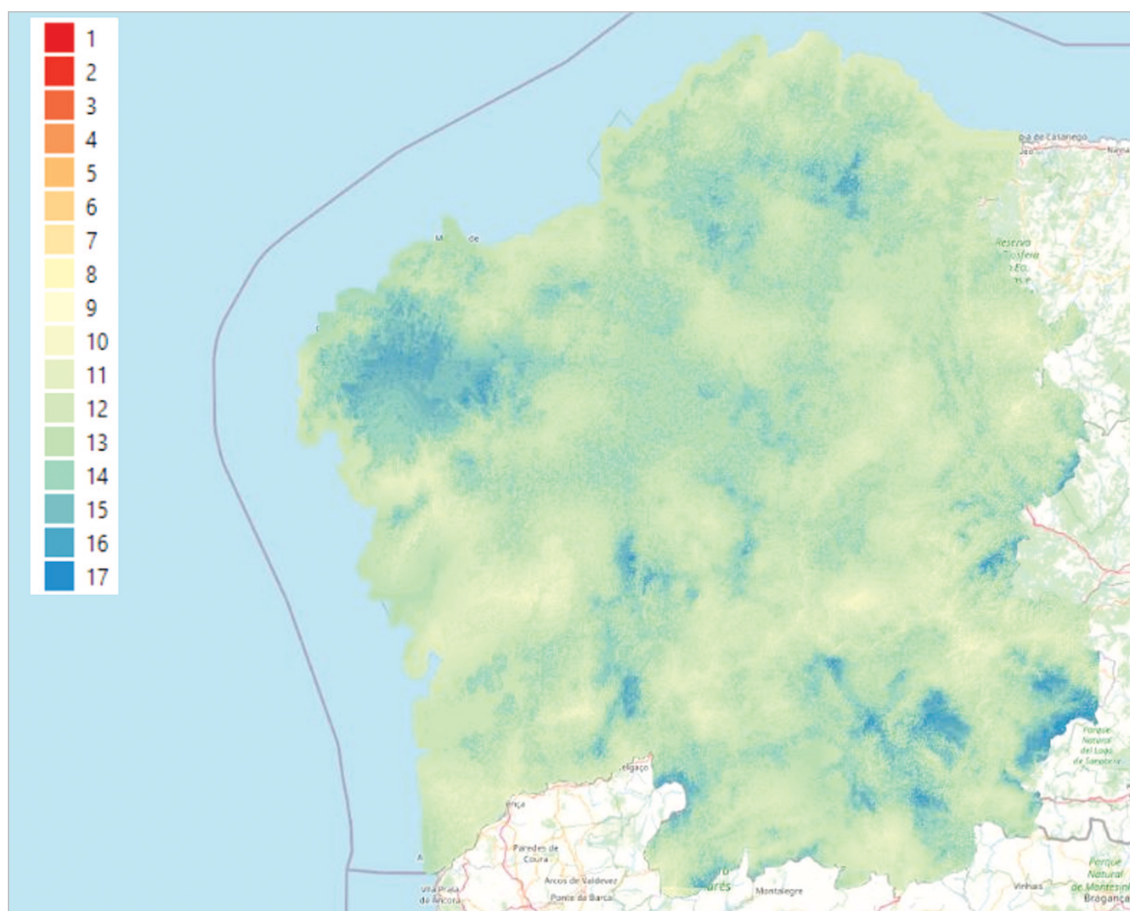


Figura 8. Mapa de riesgo con los valores del índice desarrollado en Galicia el 11-11-2020 a las 10:00 horas. Los colores azules indican menor riesgo de incendio (valor del índice igual a 17) y los colores rojos indican el riesgo de incendio extremo (valor del índice igual a 1).

licia en comparación con otros índices como FWI o el índice de Riesgo Diario de Incendio de AEMET también basado en FWI, es el mayor aumento de resolución espacial que permite incorporar la información de la recurrencia de incendios. La resolución obtenida por el índice es de 25×25 metros, llegando a tener en cada píxel una resolución de 625 m^2 en lugar de 81 km^2 que obtiene Copernicus o 25 km^2 que obtiene AEMET para España. Esta resolución permite a cada píxel incorporar la información de todos los incendios de Galicia volados con aeronaves tripuladas, llegando incluso hasta los conatos. Sin este tipo de resolución, la cual no está disponible en los índices mayormente utilizados por las administraciones, no se puede añadir la información de la recurrencia de incendios.

En cuanto a la resolución temporal, es un índice que permite observar la evolución del riesgo durante un mismo día, ya que está preparado para ser calculado 6 veces. Esto es una ventaja frente a otros índices, por ejemplo, los que utilizan imágenes de satélite como el de Sánchez *et al.* (2018) que, aunque pueden ser más precisos, se basan en imágenes de satélite que se obtienen cada 5 días. Por tanto, no es posible una comparativa entre índices debido a la variación de resoluciones espacia-

les, ya que cualquier píxel calculado por FWI o AEMET en comparación con el índice calculado en este trabajo, le corresponden al menos 130000 o 40000 píxeles respectivamente.

Aun así, la importancia de añadir la recurrencia ya la destacan otros autores como Price *et al.* (2015), que han demostrado que, en territorios como Galicia con alta frecuencia de incendios, un incendio anterior sí puede afectar a la superficie quemada de otro incendio futuro. Además, otros índices como el generado por el proyecto Firemap (Chuvieco *et al.*, 2010) también tienen en cuenta los factores humanos, a partir de regresiones logísticas, pero no tienen en cuenta la importancia de la recurrencia histórica sobre una misma zona geográfica.

Las altas resoluciones temporales y espaciales ofrecidas por este índice respecto a los utilizados habitualmente, podrían permitir a los responsables públicos de la lucha contra incendios forestales tomar decisiones para establecer las ubicaciones más adecuadas de las bases de las brigadas, de los helicópteros de extinción o movilizar recursos de unas a otras en función de los valores del índice propuesto.

Realmente, este trabajo parte de un índice ampliamente validado como el índice ICONA, al que se le ha añadido información como la recurrencia de incendios originados intencionadamente por el hombre para comunidades como la de Galicia, que sufre este problema como muchos otros autores ya han estudiado incluyendo esta información desde otras fuentes (López y Marey, 2017; Iglesia, 2007).

5. Conclusiones

El índice desarrollado permite obtener resultados más precisos en Galicia que los que se obtienen empleando el índice ICONA. Esto se debe a que este índice no refleja el factor antrópico. Galicia es una zona donde hay ciertas áreas que tienen incendios de forma reiterada durante varios años. La mayor parte de estos incendios se inician por intervención humana, ya sean incendios no intencionados o provocados. El hecho de añadir una modificación en función de la recurrencia de incendios permite considerar estos factores mejorando así los resultados obtenidos. Además, el hecho de poder variar los pesos a la hora de calcular el índice de riesgo, permite adaptar el mismo índice a diferentes regiones, simplemente modificando los datos de entrada correspondientes.

Para calcular el riesgo de ocurrencia de incendios se puede usar un registro de incendios creado a partir del trabajo de las aeronaves de extinción de incendios y/o brigadistas. De esta forma se tienen datos de todos los incendios existentes en la zona, y no sólo únicamente aquellos que tienen un tamaño determinado, que son los que aparecen en el registro de los detectados por satélite.

Una línea de trabajo abierta consistiría en utilizar otro índice existente y ampliamente empleado, calcularlo con mayor resolución y probar si la combinación de éste con el índice basado en la recurrencia ofrece mejores resultados que la combinación con el índice ICONA. También podría plantearse un algoritmo que escogiese los pesos óptimos de los índices en cada región, ya que en este trabajo se han escogido por los resultados obtenidos entre las cinco combinaciones de pesos

planteadas. Por otro lado, sería importante estudiar cómo afecta al índice el tiempo transcurrido desde que hubo el último incendio para esa zona y cómo afecta esta diferencia de tiempo a la superficie del nuevo incendio. Collins *et al.* (2021) muestran la relación existente entre los incendios ocurridos y su peligrosidad y la probabilidad de que ocurran nuevos incendios en la misma zona, en los bosques de eucaliptos de Australia; un estudio similar podría aplicarse en Galicia, para analizar también la peligrosidad de los futuros incendios.

Agradecimientos/Financiación

Los autores agradecen el apoyo del proyecto Civil Uavs Initiative de la Agencia Gallega de Innovación (GAIN) de la Xunta de Galicia. También agradecen a la empresa aeronáutica Babcock.

También se agradece al proyecto Cluster de grupos de investigación en Matemáticas (EQC2018-005334-P) del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades.

6. Bibliografía

- Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Estadística del índice meteorológico de riesgo de incendios. http://www.aemet.es/documentos/es/datos_abiertos/Estadisticas/IM_riesgo_incendios/eimri_generalidades.pdf Accessed. 6 December 2021.
- Bradshaw, L.S.; Deeming, J.E.; Burgan, Robert E.; Cohen, J.D.; 1983. The 1978 National Fire-Danger Rating System. Intermountain Forest and Range Experiment Station Ogden, Utah 84401. *Tech. Rep.* 169. <https://doi.org/10.2737/INT-GTR-169>
- Burbidge, R.; Buxton, B.; 2001. An introduction to support vector machines for data mining. Keynote papers, young, OR12, 3-15.
- Castedo-Dorado, F.; Juárez, I.; Ramírez, J.; Ruiz, I.; Rodríguez, C.; Vélez, L.; 2007. Utilidad del análisis de la estadística de incendios en las estrategias de prevención y extinción. Un caso de estudio. In: Proceedings of the 4th International Wildland Fire Conference, 14-18 Mayo, Sevilla.
- Chuvieco, E.; Aguado, I.; Yebra, M.; Nieto, H.; Salas, J.; Martín, M.P.; Vilar, L.; Martínez, J.; Martín, S.; Ibarra, P.; de la Riva, J.; Baeza, J.; Rodríguez, F.; Molina, J.R.; Herrera, M.A.; Zamora, R.; 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221, 1, 46-58. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2008.11.017>
- Collins, L.; Hunter, A.; McColl-Gausden, S.; Penman, T.D.; Zylstra, P. (2021). The Effect of Antecedent Fire Severity on Reburn Severity and Fuel Structure in a Resprouting Eucalypt Forest in Victoria, Australia. *Forests*, 12, 250. <https://doi.org/10.3390/f12040450>
- Consellería do Medio Rural, 2020. Plan de Prevención y Defensa contra los Incendios Forestales de Galicia (PLADIGA). Xunta de Galicia.
- Cubo, J.E.; Enríquez, E.; Gallar, J.J.; Jemes, V.; López, M.; Mateo, M.L.; Muñoz, A.; Parra, P.J.; 2012. Los Incendios Forestales en España, Decenio 2001-2010. Área de Defensa contra Incendios Forestales (ADCIF) del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.
- Diego, J.; Fernández, M.; Rúa, A.; 2020. Influencia de la realidad socioeconómica de Galicia en

- la dinámica de producción de incendios forestales. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, 84, 2839, 1-37.
- Dentoni, M.C.; Muñoz, M.M.; 2012. Sistemas de Evaluación de Peligros de Incendios. Programa Nacional de Evaluación de Peligro de Incendios y Alerta Temprana. Plan Nacional de Manejo del Fuego. *Tech. Rep.* 1.
- Dowdy, A.J.; Mills, G.A.; Finkele, C.; de Groot, W.; 2009. Australian fire weather as represented by the McArthur Forest Fire Danger Index and the Canadian Forest Fire Weather Index. Centre for Australian Weather and Climate Research. *Tech. Rep.* 10.
- Farfán, M.; Pérez-Salicrup, D. R.; Flamenco-Sandoval, A.; Nicasio-Arzeta, S.; Mas, J-F., Ramírez, I.; 2018. Modeling anthropic factors as drivers of wildfire occurrence at the Monarch Butterfly Biosphere. *Madera y Bosques*, 24, 3, 243-259. <https://doi.org/10.21829/myb.2018.2431591>
- Forestry Canada Fire Danger Group, 1992. Development and structure of the Canadian forest fire behavior prediction system. Ottawa, ON, Forestry Canada, Rep ST-X-3.
- Franco, C.; Revert, A.; Mediavilla, J.; Núñez, J.A.; 2019. Análisis estadístico de incendios forestales en la Comunitat Valenciana y modificación del índice de peligrosidad de incendios (PIF). Sexto Simposio Nacional de Predicción - Memorial Antonio Mestre, pp. 697 - 708. <https://doi.org/10.31978/639-19-010-0.697>
- Fernandes, P.M.; 2019. Variation in the Canadian Fire Weather Index Thresholds for Increasingly Larger Fires in Portugal. *Forests*, 10, 838. <https://doi.org/10.3390/f10100838>
- Govern de les Illes Balears, 2015. IV Plan General de Defensa contra Incendios Forestales de las Islas Baleares. Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Territori.
- de Groot, W.J.; Field, R.D.; Brady, M.A.; Roswintarti, O.; Mohamad, M.; 2007. Development of the Indonesian and Malaysian fire danger rating systems. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 12(1), 165. <https://doi.org/10.1007/s11027-006-9043-8>
- de Groot, W.J., Wotton, B.M., Flannigan, M.D., 2014. Wildland Fire Danger Rating and Early Warning Systems. In: Paton, D., Buergelt, P.T., McCaffrey, S., Tedim, F. (eds.), *Wildfire Hazards, Risks, and Disasters*. Elsevier, Netherlands, pp. 207-228. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-410434-1.00011-7>
- Iglesia, A.C.; 2007. Los incendios en el monte comunal gallego: Lugo durante el primer franquismo. *Historia agraria: Revista de agricultura e historia rural*, (43), 555-580.
- JRC Technical Report, 2019. Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2019. URL: https://effis-gwis-cms.s3-eu-west-1.amazonaws.com/effis/reports-and-publications/annual-fire-reports/2019_Fire_Report_HighRes_final_PTcorrection/Annual_Report_2019_final_topdf_2.pdf Accessed. 21 October 2021.
- Junta de Andalucía. Plan de Emergencia ante el Riesgo de Incendios Forestales en Andalucía (PLEIF). URL: https://descargasrediam.cica.es/repo/s/RUR?path=%2F06_RIESGOS_NATURALES_TECNOLOG%2F01_RIESGOS_NATURALES%2F01_RIESGO_INCENDIOS%2FIndices_riesgo_incendio%2FDocumentos Accessed. 23 March 2021.
- López, G.; Marey, M.F.; 2017. Análisis de series de noticias para introducir la conflictividad en el modelo de predicción de incendios forestales para Galicia. XXI Congreso Internacional de Dirección e Ingeniería de Proyectos, Cádiz.
- Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación, 2019. Los Incendios Forestales en España. Decenio 2006-2015. Madrid.
- Ministerio del Medio Ambiente. Clave Fotográfica para la Identificación de los Modelos de Combustible. Defensa Contra los Incendios Forestales. URL: <http://agroambient.gva.es/doc>

- uments/162905929/169203680/Clave+ICONA/0d410138-8f22-45b9-bbf9-34851c6205e2 Accessed. 05 febrero 2021.
- Mölders, N.; 2010. Comparison of Canadian Forest Fire Danger Rating System and National Fire Danger System fire indices derived from Weather Research and Forecasting (WFR) model data for the June 2005 Interior Alaska wildfires. *Atmospheric Research*, 95, 290-306. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2009.03.010>
- Onderka, M.; Melichercik, I.; 2009. Spatial discretization of the Nesterov fire rating index using multispectral satellite imagery. *Meteorologick_ _asopis*, 12, 2-3. <https://doi.org/10.1007/s12518-009-0014-0>
- Pereira, F.T.; Souza, G.; Martins, S.V.; Renato, S.; 2017. Analysis of efficiency of fire danger indices in forest fire prediction. *Revista Árvore*, 41(2). <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000200009>
- Prado, M.C.; 2014. *Diseño de un modelo SIG para la determinación de zonas en riesgo por incendios forestales en los cerros orientales en la ciudad de Bogotá*. Tesis Doctoral. Universidad Nacional de Colombia.
- Price, O.F.; Pausas, J.G.; Brooks, M.L.; Bird, R.B.; 2015. Global patterns in fire leverage: the response of annual area burnt to previous fire. *International Journal of Wildland Fire*, 24(3), 297-306. <https://doi.org/10.1071/WF14034>
- QGIS.org, 2021. "QGIS Geographic Information System." QGIS Association. URL <http://www.qgis.org>.
- R Core Team, 2019. "R: A language and environment for statistical computing". R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Resco, V.; Nolan, R.H.; 2021. Some Challenges for Forest Fire Risk Predictions in the 21st Century. *Forests*, 12, 469. <https://doi.org/10.3390/f12040469>
- Sánchez, Y.; Martínez-Graña, A.; Santos, F.; Mateos, M.; 2018. Mapping Wildfire Ignition Probability Using Sentinel 2 and LiDAR (Jerte Valley, Cáceres, Spain). *Sensors*, 18, 826. <https://doi.org/10.3390/s18030826>
- Seidl, R.; Fernandes, P.M.; Fonseca, T.F.; Gillet, F.; Jönsson, A.M.; Merganicová, K.; Netherer, S.; Arpaci, A.; Bontemps, J.-D.; Bugmann, H.; González-Olabarria, J.R.; Lasch, P.; Meredieu, C.; Moreira, F.; Schelhaas, M.-J.; Mohren, F.; 2011. Modelling natural disturbances in forest ecosystems: a review. *Ecological Modelling*, 222, 903-924. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2010.09.040>
- Senra F.; Venegas, J.; Ruiz, C.; Castelló, F.; Seseña, A.; 2018. Revisión de estudio básico de riesgos asociados a los incendios forestales. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía.
- Skolova, M.; Szpakowicz, S.; Japkowicz, N.; 2006. Beyond Accuracy, F-Score and ROC: A Family of Discriminant Measures for Performance Evaluation. Conference Paper in Advances in Artificial Intelligence. https://doi.org/10.1007/11941439_114
- Van Wagner, C.E.; 1987. Development and Structure of the Canadian Forest Fire Weather Index System. Ottawa, ON, Canadian Forestry Service, *Tech. Rep.* 35.
- Vélez, R.; 2000. *La Defensa Contra Incendios Forestales. Fundamentos y Experiencias*. McGraw-Hill, España.
- Vélez, R.; García, A.; 1993. *Principios de Inferencia Estadística*. UNED, España.
- de Vicente, F.J., 2012. *Diseño de un modelo de riesgo integral de incendios forestales mediante técnicas multicriterio y su automatización en sistemas de información geográfica. Una aplicación en la Comunidad Valenciana*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.

de Vicente J.; Crespo, F.; 2012. A new wildland fire danger index for a Mediterranean region and some validation aspects. *International Journal of Wildland Fire*, 21, 1030.1040. <https://doi.org/10.1071/WF11046>