



2025 | 16-20
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1676

Actas del Noveno Congreso Forestal Español
Edita: **Sociedad Española de Ciencias Forestales. 2025.**
ISBN: **978-84-941695-7-1**

Organiza





Análisis espacial de la influencia de la Interfaz Urbano forestal sobre las igniciones en la Comunidad Valenciana para el periodo 2010-2023

GONZÁLEZ-ROMERO J., GAYO PIQUERAS, E. , AMBROSIO TORRIJOS, Y. , TOLOSANA ESTEBAN, E. y LAINA RELAÑO, R.

Universidad Politécnica de Madrid (UPM), ETS de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. Madrid 02071, España.

Resumen

Los incendios forestales, intensificados por el cambio climático y el abandono rural, representan un problema global que afecta gravemente al medio ambiente, la sociedad y la economía. En este contexto, la Comunidad Valenciana, debido a su densa Interfaz Urbano-Forestal (IUF), es especialmente vulnerable. Este estudio analiza la relación entre la IUF y las igniciones en la región durante el período 2010-2023, centrándose en patrones espaciales y temporales.

Para ello, se empleó una base de datos de 4889 incendios, complementada con cartografía específica que delimitó las zonas de IUF. A través de modelos estadísticos, como la regresión lineal y un modelo lineal generalizado mixto (GLMM), se evaluaron factores como la distancia a la IUF, el tipo de combustible y el uso del suelo. Además, se aplicaron análisis geoestadísticos para examinar cambios en la densidad de igniciones a lo largo del periodo estudiado.

Los resultados revelan que el 36,1% de las igniciones ocurrieron dentro de la IUF, aunque esta solo representa el 15% del territorio. Las áreas cercanas a la IUF mostraron mayor riesgo de ignición, con una correlación moderada entre la extensión de la IUF y el número de incendios. El modelo predictivo alcanzó un AUC de 0.813, destacando la influencia significativa de factores como la proximidad a la IUF y la presencia de combustibles herbáceos.

Se observó un aumento en el número de igniciones en la IUF entre 2016-2023, aunque su densidad disminuyó en algunas áreas, sugiriendo una redistribución espacial. Estas tendencias contrastan con las igniciones fuera de la IUF, que aumentaron en densidad en zonas forestales del interior.

Palabras clave

Prevención de Incendios forestales, Interfaz urbano-forestal, Patrón de Ignición, Zonas Estratégicas de Gestión.

1. Introducción

Los incendios forestales representan un desafío global creciente, intensificado por el cambio climático y factores como el abandono rural, la acumulación de combustible y el aumento de temperaturas. Estas condiciones favorecen incendios de gran magnitud que impactan tanto ambiental como socialmente, agravando problemas como la emisión de gases de efecto invernadero, la pérdida de biodiversidad y la degradación de suelos (SINGH, 2022). Además, las prácticas humanas y el régimen de incendios influyen mutuamente, siendo esenciales en la gestión de la exposición y vulnerabilidad al fuego (PAUSAS & FERNÁNDEZ-MUÑOZ, 2012).



Entre las principales causas de los incendios destacan las prácticas agrícolas y ganaderas, la mala planificación territorial y el cambio de uso del suelo, que incrementa la ignición y propagación del fuego. La expansión urbana en áreas forestales y el abandono de aprovechamientos agroforestales han alterado los paisajes, favoreciendo la acumulación de combustible y creando corredores que intensifican los incendios (PAUSAS & FERNÁNDEZ-MUÑOZ, 2012). La "paradoja de la extinción" evidencia cómo la supresión de incendios menores contribuye a incendios más destructivos, subrayando la necesidad de una gestión equilibrada que contemple soluciones sostenibles (COLLINS & STEPHENS, 2010).

Las consecuencias de los incendios incluyen efectos ambientales, como la pérdida de biodiversidad y emisiones de gases entre otros, así como impactos políticos, sociales y económicos. En Europa, los incendios forestales causaron pérdidas de 4.1 mil millones de euros en 2023, con España como uno de los países más afectados (GUTTRIDGE-HEWITT, 2023). En España, la planificación debe centrarse en el clima proyectado y en bases de datos que permitan anticipar respuestas, ya que los incendios tienden a repetirse geográficamente (MORENO et al., 2015).

La Interfaz Urbano-Forestal (IUF) es una zona clave en la gestión del riesgo de incendios debido a la proximidad entre áreas residenciales y forestales. En Europa, y particularmente en la región mediterránea, la expansión urbana descontrolada y el abandono agrícola han elevado significativamente el riesgo de incendios. En España, las zonas costeras y turísticas como la costa de la Comunidad Valenciana, la Costa Brava o las Islas Baleares son especialmente vulnerables, destacando la necesidad de políticas adaptadas al contexto territorial (MODUGNO, et al., 2016; PASTOR, et al., 2019).

Los recientes incendios en distintas regiones del mundo, como los de Pedrógão Grande (Portugal, 2017), Mati (Grecia, 2018), Camp Fire (California, 2018) y Maui (Hawái, 2023), han evidenciado el devastador impacto de estos eventos en las zonas de IUF. Estos incendios han provocado un alto costo en vidas humanas, además de significativas pérdidas económicas debido a los daños y la destrucción de infraestructuras, así como la devastación de miles de hectáreas de bosques.

La IUF presente en el territorio valenciano, supone un reto para la gestión forestal al que atender de forma pormenorizada, ya que su configuración le otorga alto riesgo de incendio. Entendiendo el riesgo como el conjunto de peligro, exposición y vulnerabilidad, la interfaz puntúa alto en los tres componentes: generan frecuentemente fuegos con potencial evolución a incendio, supone una transición de suelos urbanos en el monte (exposición) y suele constar de viviendas con pocas vías de escape, si bien es cierto que suele tratarse de segundas residencias (GARAY, et al., 2023). Según el estudio de MADRIGAL, et al. (2013) aproximadamente el 21% de las viviendas en la provincia de Valencia se encuentran en zonas clasificadas como IUF, lo que aumenta significativamente la vulnerabilidad de estas áreas a los incendios. La alta vulnerabilidad de la IUF en el territorio valenciano se ve agravada por el régimen de incendios característico del clima mediterráneo, donde factores climáticos y bióticos favorecen la propagación del fuego, especialmente en estas zonas de transición que combinan suelos urbanos con áreas forestales altamente inflamables.

En enero de 2022, entró en vigor la normativa actualizada en la Comunidad Valenciana a través de la reforma del Decreto Legislativo 1/2021, de 18 de junio, del Consell, que aprueba el texto refundido de la Ley de Ordenación del Territorio, Urbanismo y Paisaje. Esta legislación asigna a los municipios la responsabilidad de



identificar y delimitar las áreas de IUF dentro de sus territorios. Además, impone a los propietarios la obligación de llevar a cabo medidas preventivas contra incendios forestales en dichas zonas, cumpliendo con plazos establecidos. Esta regulación ha despertado un interés creciente en analizar la relación entre la gestión de estas áreas de interfaz urbano-forestal de la Comunidad Valenciana y los incendios forestales en la región. Este estudio en concreto se centra en estudiar la relación entre estas áreas de IUF y los patrones espaciales y temporales de las igniciones.

2. Objetivos

El principal objetivo de esta comunicación es analizar la influencia de la IUF en las igniciones producidas en la Comunidad Valenciana durante el periodo 2010-2023, empleando un enfoque que permita integrar distintos aspectos espaciales y temporales de la dinámica de los incendios.

Para el cumplimiento de este objetivo principal, se plantean los siguientes objetivos secundarios:

- Analizar la relación entre la proporción de superficie municipal ocupada por la IUF y el número de igniciones de cada municipio.
- Estimar la probabilidad de ignición a nivel municipal, considerando variables como la distancia a la IUF, el tipo de combustible y el uso del suelo, con el fin de localizar zonas de mayor riesgo e interpretar la influencia específica de la IUF en la ignición de incendios.
- Identificar y caracterizar las áreas con mayores incrementos o disminuciones en la densidad de igniciones a lo largo del tiempo, evaluando la influencia de la IUF en la distribución espacial y temporal del régimen de incendios en la Comunidad Valenciana.

3. Metodología Base de datos y cartografía

Para el análisis de incendios forestales en la Comunidad Valenciana y su relación con la interfaz urbano-forestal (IUF), se construyó una base de datos que incluye todos los incendios registrados entre 1993 y 2023. Sin embargo, los análisis se centraron en el período 2010-2023, que consta de 4.889 incendios con información más fiable en cuanto a coordenadas y causalidad, registrada y revisada por técnicos de la administración. La base de datos fue sometida a un proceso de homogeneización para garantizar la consistencia en los campos y atributos a lo largo del tiempo.

La cartografía desarrollada en este estudio define la interfaz urbano-forestal como la intersección entre zonas urbanas y forestales. El método empleado, resumido en la Figura 1, aplica un margen de 100 metros alrededor de las zonas urbanas y 200 metros alrededor de las zonas forestales, siguiendo la metodología de MODUGNO et al. (2016). Este estudio, que propone una interfaz de escala europea con márgenes de 200 metros para zonas urbanas y 400 metros para zonas forestales, señala que los parámetros deben ajustarse según la región, la escala del análisis y la disponibilidad de datos. En este caso, se adoptaron los márgenes recomendados por la normativa portuguesa (100 m para zonas urbanas y 200 m para forestales).

Por lo tanto, la cartografía de zonas urbanas se configuró aplicando un margen de 100 metros alrededor de las edificaciones de la Comunidad Valenciana, utilizando datos disponibles en el visor ambiental de la Generalitat Valenciana. Las edificaciones incluidas en esta cartografía fueron aquellas consideradas de interés, como edificios en urbanización, naves agroindustriales, agrupaciones de edificios y cementerios, mientras que estructuras como monumentos fueron descartadas.

La otra parte de información que construye la IUF es la superficie forestal, generada a partir de aquellas teselas consideradas como forestales (USO_IFN) en el mapa forestal español de escala 1:50000 y aplicándoles un buffer de 200 m.

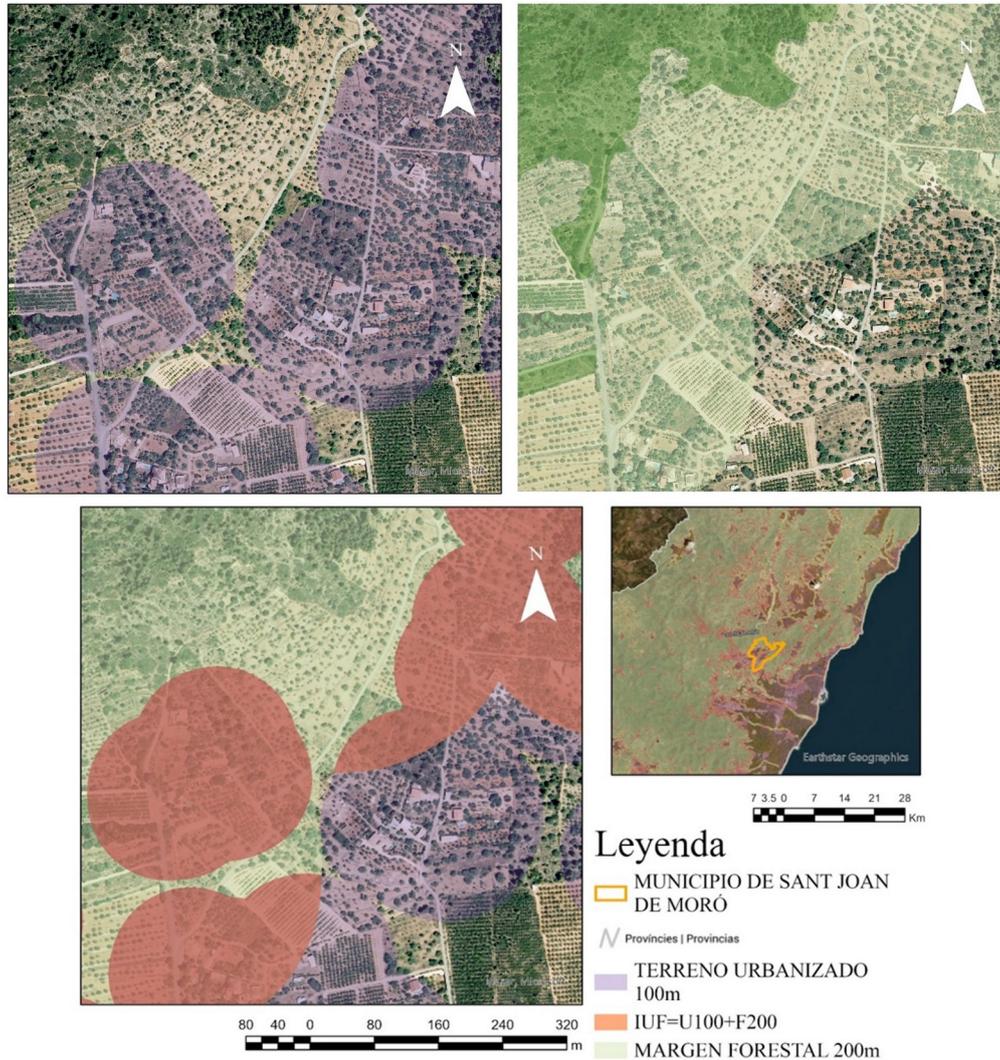


Figura 1. Mapa de la cartografía de la interfaz urbano-forestal (IUF) en la zona de Sant Joan de Moró (delimitado en amarillo), mostrando el área de influencia forestal en verde, el área de influencia urbana en morado y la interfaz urbano-forestal en rojo, como intersección de ambas.

Clasificación

Una vez construida la base de datos y la cartografía de interfaz, se analizó la relación de los incendios registrados con la interfaz urbano-forestal (IUF), clasificándolos en tres categorías según su posición relativa a la interfaz:

- **Igniciones dentro de la interfaz:** Aquellas cuyo punto d se encuentra dentro de la cartografía de la IUF.
- **Igniciones fuera de la interfaz:** Aquellas cuyo punto se encuentra fuera de la cartografía de la IUF.

Análisis estadístico

Para analizar la relación entre la superficie de IUF y el número de igniciones, se calculó el porcentaje de superficie a nivel municipal perteneciente a estas zonas de IUF y se desarrollaron modelos de regresión lineal a nivel autonómico y provincial. Estos modelos evaluaron el grado de asociación entre la variable de porcentaje de superficie en IUF de cada municipio y la variable número de igniciones, empleando el coeficiente de determinación (R^2) como indicador de la capacidad explicativa. Asimismo, se verificaron los supuestos de normalidad y homogeneidad de varianzas en los residuos para asegurar la validez estadística de los resultados.

Para estimar la probabilidad de ignición en función de factores como la distancia a la IUF, el tipo de combustible y los usos del suelo se utilizó un modelo lineal generalizado mixto (GLMM). Este modelo incluyó un efecto aleatorio a nivel municipal, lo que permitió capturar la variabilidad espacial que no pudo ser explicada por las variables incluidas en el modelo.

Para analizar la influencia de la interfaz urbano-forestal (IUF) en las igniciones, se estudió la distancia entre los puntos de ignición y la capa de IUF generada. Adicionalmente, se generaron 1500 puntos aleatorios en áreas no quemadas desde el inicio de la serie temporal, permitiendo modelar la probabilidad de ignición en función de la distancia a la interfaz utilizando herramientas del software ArcGIS Pro. La distancia entre los puntos de ignición y la IUF se escaló utilizando la desviación estándar. Este procedimiento tuvo como propósito estandarizar la variable y facilitar su interpretación en términos comparables a las demás covariables del modelo, asegurando que su influencia no estuviera desproporcionada debido a su rango de valores.

Como se ha mencionado, en esta modelización también se incluyeron como variables el modelo de combustible y el uso del suelo asociados a cada punto de ignición. El modelo de combustible se obtuvo de dos fuentes: los modelos de combustible forestal de la Comunidad Valenciana disponibles en el PATFOR para igniciones anteriores a 2018, y los modelos publicados en 2018 por la Generalitat Valenciana. El uso del suelo se derivó de las distintas actualizaciones del Corine Land Cover, considerando la fecha de la ignición para garantizar su correspondencia temporal. Para eliminar un exceso de categorías dentro de estas variables se agruparon tanto los usos del suelo como los modelos de combustible como se muestra en la Tabla 1:

*Tabla 1. Categorización de los códigos de los distintos modelos de combustible y los usos del suelo para su introducción en el modelo GLMM. * Estas categorías fueron eliminadas del análisis al tener ningún o muy pocos datos.*

Categoría GLMM	Códigos 18-23	Códigos 10-17
Herbáceas	GR- 2,4,7,8	1,2,3
Matorral	SH- 1,3,4,5,9	4,5,6,7
Sotobosque	TU-1,2,3,5	8,9,10
Restos*	SB-3	11,12,13
No combustible	NB-1,3,8,9	-

Categoría GLMM	Código CLC
Urbano	1
Agrícola	2
Forestal	3
Humedales	4
Cuerpos de agua*	5

El desempeño del modelo se evaluó utilizando dos métricas clave. En primer lugar, se calculó el área bajo la curva (AUC) de la curva ROC (Receiver Operating Characteristic), una herramienta ampliamente utilizada para medir la capacidad discriminativa de los modelos de clasificación. En segundo lugar, se empleó el R^2 propuesto por NAKAGAWA & SCHIELZETH (2013), diseñado específicamente para modelos lineales generalizados mixtos. Este enfoque permite descomponer la varianza explicada en dos componentes: el R^2 marginal, que captura la proporción de varianza explicada por los efectos fijos del modelo, y el R^2 condicional, que incluye tanto los efectos fijos como los aleatorios. Estas métricas proporcionaron una visión integral del desempeño del modelo, evaluando tanto su capacidad predictiva como explicativa. Adicionalmente, se realizó un test de Chi-cuadrado para comparar el modelo ajustado con un modelo nulo, evaluando la significancia global del modelo.

Posteriormente, se utilizaron las probabilidades predichas por el modelo para generar un mapa de probabilidad de ignición por municipio. Las probabilidades se calcularon para cada observación y, posteriormente, se promediaron dentro de cada municipio para obtener una probabilidad media de ignición por unidad territorial. Finalmente, estas probabilidades promedio se procesaron y visualizaron empleando herramientas geoespaciales de R.

Por último, con el objetivo de identificar y caracterizar las áreas con mayores incrementos o disminuciones en la densidad de igniciones a lo largo del tiempo, se llevó a cabo un análisis geoestadístico basado en densidades Kernel. Este enfoque permitió estimar la distribución espacial de las igniciones en dos periodos temporales (2010-2015 y 2016-2023), considerando tanto el conjunto de igniciones como aquellas asociadas específicamente a la IUF y a zonas fuera de ella.

Para ello, se utilizaron las igniciones registradas en el periodo de estudio, las cuales fueron procesadas como patrones de puntos mediante el paquete “spatstat” en R. Estas igniciones se representaron como datos espaciales en un sistema de coordenadas UTM (EPSG:25830), y se aplicaron funciones de densidad Kernel para calcular la concentración de puntos en el territorio. Este análisis se realizó de forma separada para cada periodo, empleando un ancho de banda de 7500 metros ajustado para capturar patrones a escala regional.

Posteriormente, se calcularon las diferencias de densidad entre los dos periodos analizados (2016_2023 – 2010_2015), obteniendo una capa que refleja las áreas donde se produjeron incrementos o disminuciones en la densidad de igniciones. Para clasificar los cambios en la densidad, se empleó una categorización basada en los límites globales de las diferencias detectadas definiendo intervalos específicos que permitieron agrupar las áreas en categorías según la magnitud del cambio.



Para determinar los límites de cada intervalo, el rango total de las diferencias de densidad (valor máximo menos valor mínimo) se dividió en seis partes iguales. Los límites de las categorías se calcularon de la siguiente manera:

- **Disminución alta:** Desde el valor mínimo hasta el mínimo más un sexto del rango total.
- **Disminución moderada:** Desde el límite superior de la categoría anterior hasta el mínimo más dos sextos del rango.
- **Disminución baja:** Desde el límite superior de la categoría anterior hasta el cero.
- **Incremento bajo:** Desde el cero hasta el máximo menos dos sextos del rango.
- **Incremento moderado:** Desde el límite superior de la categoría anterior hasta el máximo menos un sexto del rango.
- **Incremento alto:** Desde el límite superior de la categoría anterior hasta el valor máximo.

Esta clasificación se aplicó de manera consistente en los tres grupos (global, IUF y no IUF) para permitir la comparación entre ellos.

4. Resultados

En una primera aproximación meramente descriptiva a la base de datos, como se observa en la Tabla 2, entre 2010 y 2023 se registraron 4889 igniciones que afectaron una superficie total de 135488.9 hectáreas. De estas, el 36.1% de las igniciones ocurrieron en áreas de IUF, mientras que el 63.9% restante tuvieron lugar fuera de estas áreas. Este patrón refleja la distribución predominante de incendios en zonas fuera de la IUF, aunque la proporción de igniciones dentro de estas áreas varía considerablemente entre años.

El año 2012 destaca como un punto crítico, con el mayor número de igniciones registradas (484) y una superficie afectada significativamente alta (65561.7 hectáreas).

Los años más recientes, entre 2016 y 2023, muestran una tendencia relativamente estable, con valores cercanos al promedio general (36,1%). Este periodo también refleja una menor superficie afectada en comparación con 2012, aunque destacan los años 2022 y 2023, con incrementos en la superficie quemada (33118.5 hectáreas y 6350.4 hectáreas, respectivamente).

Al analizar el porcentaje de igniciones fuera de la IUF, se confirma su predominancia, con valores que varían entre el 55.6% en 2012 y el 69.1% en 2014. Esta proporción más alta fuera de la IUF podría explicarse por la mayor extensión de áreas forestales y rurales en comparación con las zonas de interfaz urbano-forestal.

Tabla 2. Resumen anual de igniciones forestales en la Comunidad Valenciana entre 2010 y 2023. AÑO: año de ocurrencia de las igniciones; N° Igniciones: número total de igniciones forestales registradas; S (ha): superficie total afectada en hectáreas; IUF: número de igniciones ocurridas en áreas de interfaz urbano-forestal; % IUF: porcentaje de igniciones en áreas IUF respecto al total; NO IUF: número de igniciones ocurridas fuera de áreas IUF; % NO IUF: porcentaje de igniciones fuera de áreas IUF respecto al total.

AÑO	N° Igniciones	S (ha)	IUF	% IUF	NO IUF	% NO IUF
-----	---------------	--------	-----	-------	--------	----------



2010	325	5683.2	101	31.1	224	68.9
2011	404	2408.1	143	35.4	261	64.6
2012	484	65561.7	215	44.4	269	55.6
2013	335	1493.2	120	35.8	215	64.2
2014	499	2175.0	154	30.9	345	69.1
2015	315	2472.0	105	33.3	210	66.7
2016	341	7245.1	133	39.0	208	61
2017	344	2293.7	128	37.2	216	62,8
2018	375	3997.7	124	33.1	251	66.9
2019	271	1028.8	106	39.1	165	60.9
2020	253	733.2	99	39.1	154	60.9
2021	240	928.3	87	36.3	153	63.7
2022	292	33118.5	104	35.6	188	64.4
2023	411	6350.4	148	36.0	263	64.0
TOTAL	4889	135488.9	1767	36.1	3122	63.9

En cuanto a la relación entre la superficie de IUF de cada municipio y el número de igniciones en los mismos, la Figura 2 muestra una relación positiva entre la superficie de interfaz urbano-forestal (IUF) y el número de igniciones en la Comunidad Valenciana y sus provincias. A nivel autonómico (Tabla 3), el modelo explica el 44.3% de las igniciones ($R^2=0.4428$), mientras que a nivel provincial los valores son similares: Castellón ($R^2=0.5165$), Alicante ($R^2=0.5283$) y Valencia ($R^2=0.5034$). Esto confirma una correlación moderada entre una mayor proporción de IUF y un mayor número de igniciones.

En Alicante, donde el porcentaje promedio de superficie IUF es del 20.99%, destacan Elche (52.13 km², 9.84% del municipio), Alicante capital (50.3 km², 9.31%), Orihuela (43.26 km², 8.02%) y Jávea (29.43 km², 18.78%).

En Castellón, con un promedio de superficie IUF del 11.01%, los municipios más significativos son Onda (33 km², 6.95%), l'Alcora (28.5 km², 5.99%), les Useres (23 km², 7.54%) y Morella (22 km², 5.18%). Aunque el número de igniciones está homogéneamente repartido, los municipios de la Plana Alta y el Alto Palancia destacan por concentrar más eventos.

En Valencia, con una superficie promedio de IUF del 13.87%, destacan Lliria (39.64 km², 8.12%), Chiva (28.66 km², 8.74%), Requena (27.69 km², 5.16%) y Sagunto (25.13 km², 6.91%). Los incendios se concentran principalmente en áreas como Requena (105 incendios) y Sagunto (78 incendios)

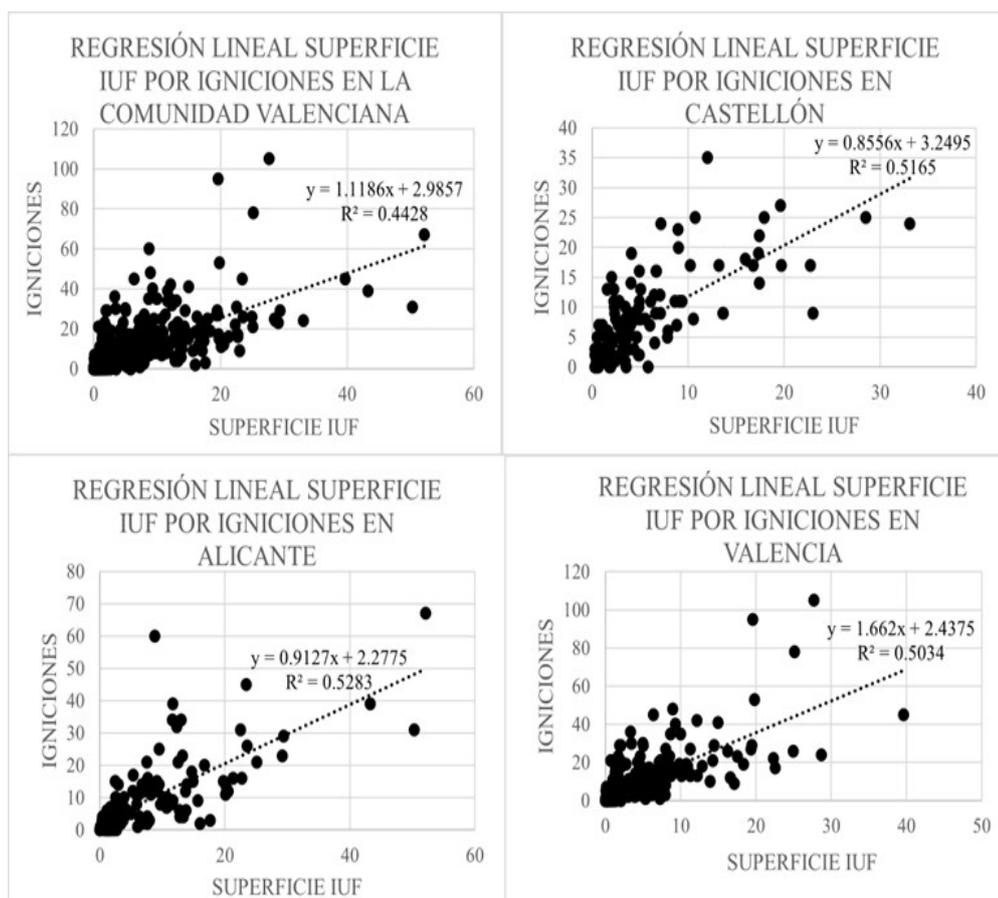


Figura 2. Relación entre la superficie de interfaz urbano-forestal (IUF) y el número de igniciones forestales en la Comunidad Valenciana y sus provincias (Castellón, Valencia y Alicante). Cada gráfico presenta una regresión lineal para mostrar la tendencia general entre ambas variables a nivel regional y provincial, utilizando datos de municipios como unidades de análisis. Se representa la tendencia de cada regresión (Linea de puntos) y el valor del coeficiente de determinación (R^2).

Tabla 3. Resumen del análisis de regresión entre la superficie de interfaz urbano-forestal (IUF) y el número de igniciones forestales por municipio en la Comunidad Valenciana y sus provincias (Castellón, Alicante y Valencia). %IUF: porcentaje de superficie IUF respecto al total; Igniciones/municipio: promedio de igniciones por municipio; R^2 : coeficiente de determinación; P: valor de p asociado, significancia estadística ($p < 0.001$).

Territorio	% IUF	Igniciones/municipio	R2	P
Comunidad Valenciana	15.01	9.01	0.443	<0.001
Castellón	11.01	7.68	0.513	<0.001
Alicante	20.99	9.29	0.525	<0.001
Valencia	13.87	9.53	0.503	<0.001

En cuanto al desempeño del modelo GLMM, la curva ROC (Receiver Operating Characteristic) permitió evaluar la capacidad discriminativa del modelo, es decir,



su habilidad para distinguir entre áreas con y sin igniciones. El área bajo la curva (AUC) obtenida fue de 0.813, lo que sugiere un buen desempeño predictivo.

Por otro lado los R^2 de NAKAGAWA & SCHIELZETH (2013), mostraron que la varianza explicada por los efectos fijos (R^2 marginal), alcanzó un valor de 0.194. Por otro lado, el R^2 condicional, que incluye tanto los efectos fijos como los aleatorios asociados a los municipios, fue de 0.260, evidenciando que la variabilidad entre municipios contribuye significativamente al ajuste del modelo. Estos resultados sugieren que el modelo logra capturar una parte relevante de la variabilidad total en el fenómeno estudiado.

La comparación con el modelo nulo mediante un test de Chi-cuadrado arrojó un valor de 456.49, altamente significativo ($p < 2.2e-16$), lo que confirma que los predictores incluidos mejoran considerablemente el ajuste del modelo.

El modelo evidencia que la distancia a la IUF tiene un efecto negativo significativo (Tabla 4), con una estimación beta de -0.54 y un valor p menor a 0.001, indicando que las igniciones son más probables cerca de la IUF. Entre los tipos de combustible, las zonas dominadas por herbáceos muestran un mayor riesgo, con una estimación beta de 0.35 y un valor p de 0.009. Por otro lado, las áreas clasificadas como no combustibles disminuyen significativamente la probabilidad de ignición, con una estimación beta de -0.66 y un valor p menor a 0.001.

En cuanto a los usos del suelo, las áreas de uso forestal arbolado incrementan significativamente el riesgo, con una estimación beta de 0.44 y un valor p menor a 0.001, mientras que las áreas urbanas reducen el riesgo, con una estimación beta de -0.55 y un valor p menor a 0.001. Las áreas de uso forestal desarbolado no muestran una influencia estadísticamente significativa.

Tabla 4. Resumen de los coeficientes estimados por el modelo de efectos mixtos generalizados (GLMM) que analiza la probabilidad de ignición según la distancia a la interfaz urbano-forestal (IUF), tipos de combustible y usos del suelo. Las estimaciones reflejan la magnitud y dirección del efecto, y los valores p indican su significancia estadística.

Variable	Estimación (β)	Error Estándar	Valor z	p-valor
Intercepto	1.435	0.137	10.497	<2e-16***
Distancia a IUF (escalada)	-0.537	0.035	-15.292	<2e-16***
Combustible: Herbáceos	0.354	0.137	2.593	0.009**
Combustible: Matorral	-0.158	0.120	-1.325	0.185
Combustible: No combustible	-0.655	0.131	-5.000	<0.001***
Uso del suelo: Forestal arbolado	0.440	0.115	3.840	<0.001***
Uso del suelo: Forestal desarbolado	0.118	0.100	1.182	0.237
Uso del suelo: Humedales	0.756	0.394	1.919	0.055
Uso del suelo: Urbano	-0.545	0.161	-3.378	<0.001***

El mapa de probabilidad de ignición resultante del modelo que se muestra en la Figura 3 revela que las zonas con mayor probabilidad de ignición (categorías Alta y Muy alta) se concentran en el sur y el interior de la región, mientras que las zonas con probabilidad baja y moderada predominan en el norte y áreas cercanas al litoral.

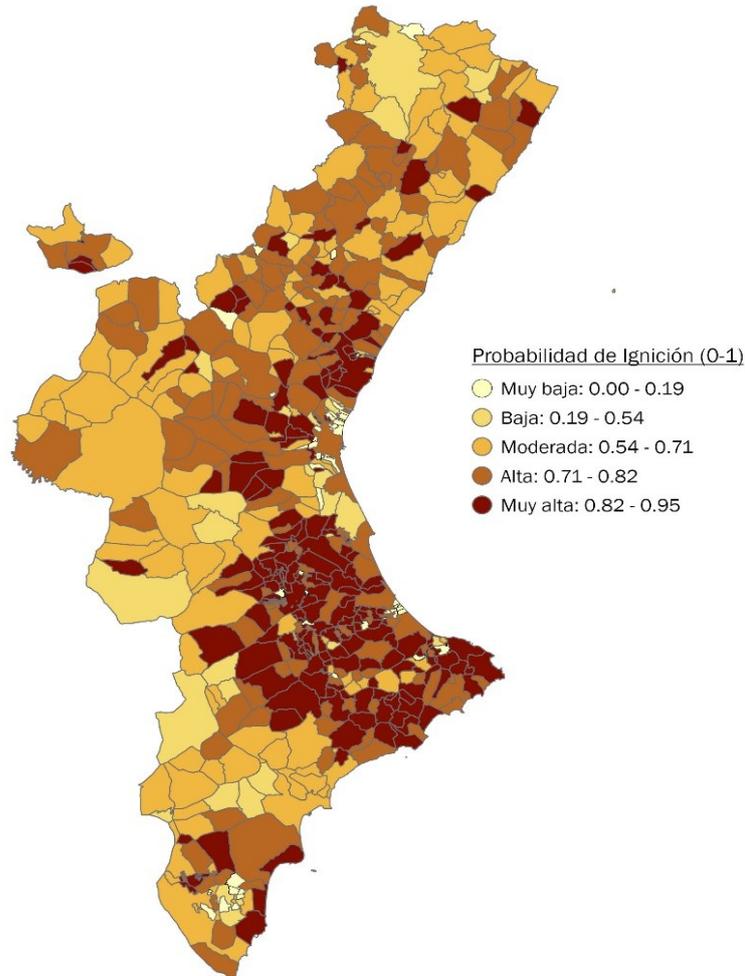


Figura 3. Distribución espacial de la probabilidad de ignición en la Comunidad Valenciana (0-1), derivada del modelo de efectos mixtos generalizados). Las categorías Muy baja, Baja, Moderada, Alta y Muy alta representan rangos de probabilidad normalizados, donde los tonos más oscuros indican mayor riesgo de ignición.

En cuanto al análisis del cambio de densidades (Figura 4) se observan patrones diferenciados tanto a nivel global como en las áreas de interfaz urbano-forestal (IUF) y fuera de estas. En términos generales, el mapa global evidencia una dinámica heterogénea en la densidad de igniciones. Las áreas con mayores incrementos de densidad se concentran principalmente en el centro alrededor del área metropolitana de Valencia y el sur de la Comunidad Valenciana, si bien hay la mayoría del territorio experimenta incrementos bajos. Las disminuciones de densidad se concentran en zonas concretas distribuidas heterogéneamente por el territorio, estando representadas las tres categorías. Las categorías “Incremento alto” y “Sin cambios” no se vieron representadas. Al comparar las igniciones dentro de la IUF y aquellas fuera de esta, se observan diferencias importantes en los patrones de variación. En cuanto a las igniciones dentro de la IUF, se evidencia un predominio de disminuciones en la densidad de igniciones, especialmente en las zonas periféricas de la región central y norte. Concentrándose las disminuciones más fuertes en áreas del interior norte y centro. Si bien ocupan menos superficie, los incrementos en densidad de las igniciones en IUF se observan en zonas cercanas a grandes núcleos urbanos del centro y sur. En cuanto a las igniciones fuera de la IUF, se observan los principales incrementos de densidad en áreas extensas en la parte norte y en el interior de la región. Al igual que en análisis a nivel global, las categorías “Incremento alto” y “Sin cambios” no se vieron representadas.

Variaciones en la densidad de igniciones en la CV para el Periodo 2010-2023

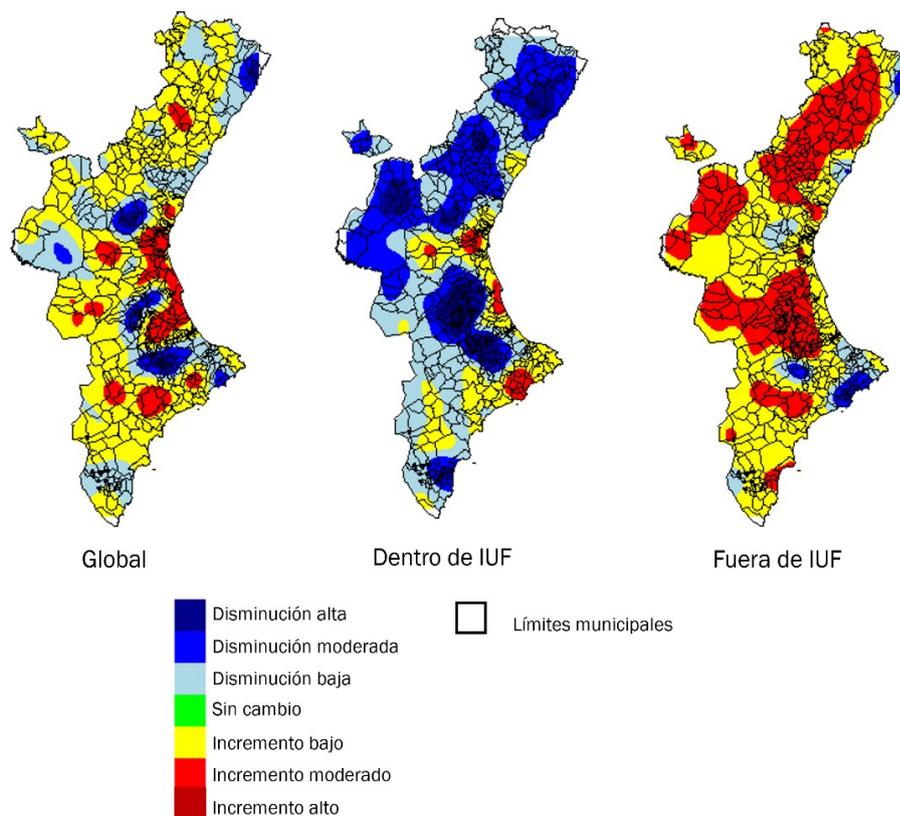


Figura 4. Variaciones en la densidad de igniciones en la Comunidad Valenciana durante el período 2010-2023. De izquierda a derecha: igniciones en el conjunto del territorio, igniciones dentro de la interfaz urbano-forestal (IUF) e igniciones fuera de



la IUF. Las disminuciones en la densidad se representan en tonos azules (azul oscuro: disminución alta, azul medio: disminución moderada, azul claro: disminución baja) y los incrementos en tonos cálidos (amarillo claro: incremento bajo, naranja: incremento moderado, rojo: incremento alto). Los límites municipales se incluyen como referencia geográfica

5. Discusión

Los resultados obtenidos en el presente estudio sobre la influencia de la IUF en las igniciones en la Comunidad Valenciana destacan varios aspectos clave que merecen ser analizados en profundidad.

En cuanto a la distribución de las igniciones con respecto a la IUF, el 36,1% de las igniciones ocurrieron dentro de la IUF ocupando esta aproximadamente un 15% del territorio lo que destaca cómo en áreas periurbanas se presenta una mayor densidad de igniciones en comparación con zonas con menores densidades de población (CHAS-AMIL et al., 2013). Autores como CHAPPAZ & GANTEAUME (2023) observaron que las zonas próximas a asentamientos humanos en el Mediterráneo francés también presentan un mayor riesgo de ignición debido a la interacción entre factores humanos y naturales. En cuanto al número de incendios que se producen en IUF vemos que hay un incremento entre el periodo 2010-2015 al periodo 2016-2023. Recientes investigaciones demuestran que, a nivel mundial, el número de incendios disminuye en un 10% entre 2001 y 2020 mientras que, en las zonas de interfaz urbano forestal, los casos de incendio aumentan en un 23%. De la misma forma, la superficie quemada disminuye en un 22% entre 2005 y 2020, mientras que en la IUF aumenta en un 35%. (TANG, et al., 2024).

Estos resultados van en concordancia con correlación moderada ($R^2=0.4428$) entre la proporción de superficie de IUF y el número de igniciones, que también indica que la IUF desempeña un papel relevante, aunque no exclusivo, en la dinámica de igniciones. Este hallazgo está en línea con el trabajo de RUIZ-CEJUDO & MADRIGAL (2013), quienes también identificaron una asociación positiva entre la IUF y las tasas de ignición.

En cuanto al desempeño del modelo GLMM, este logró un AUC de 0.813, indicando un buen poder discriminativo para predecir áreas con mayor probabilidad de ignición. Este resultado es cercano al que se observa en estudios similares al nuestro como el de CHAPPAZ & GANTEAUME (2023), cuyo modelo alcanzó un AUC cercano a 0.8, aunque con un enfoque específico en el Mediterráneo francés. Esta comparación refuerza la validez de nuestra metodología y destaca la importancia de incluir variables como combustibles, usos del suelo pero también otras como distancia a la IUF para modelar la probabilidad de ignición.

El efecto significativo de la distancia a la IUF ($\beta=-0.54$, $p<0.001$) resalta como el factor más importante del modelo, indicando que la probabilidad de ignición disminuye a medida que aumenta la distancia a la IUF. Este hallazgo subraya el papel crucial de la proximidad a áreas de interfaz en la dinámica de incendios, lo cual coincide con las observaciones de MODUGNO et al. (2016). Además, el modelo identifica a los combustibles herbáceos como los de mayor peligrosidad ($\beta=0.35$, $p=0.009$), lo que concuerda con la alta inflamabilidad y facilidad de propagación de esta tipología de combustibles especialmente bajo condiciones de sequía. Autores como MOLINA et al. (2016) subrayan la importancia de la inflamabilidad de la vegetación incluso a nivel de especie en el riesgo de incendio y enfatizan la importancia de este tipo de parámetro en la planificación territorial.



En cuanto a los cambios en la densidad de igniciones a lo largo del periodo podría parecer contradictorio que si bien las igniciones producidas en IUF incrementaron en número en el periodo 16-23 respecto del 10-15 (929 y 838 respectivamente), los cambios en cuanto a densidad muestran disminuciones moderadas en gran parte del territorio. En este sentido cabe argumentar que densidad de igniciones y nº de igniciones son parámetros distintos, y que este cambio de densidades se puede deber a una redistribución de esas igniciones en el segundo periodo de manera más dispersa en esas partes del territorio. Donde parece que esta categoría de igniciones se concentra más en el periodo 16-23 es alrededor de grandes núcleos urbanos como son Valencia, Alicante y otras zonas de la costa Valenciana. Por el contrario, las igniciones producidas fuera de la IUF aumentan su densidad en gran parte del territorio, en zonas del interior y la parte norte de la región, zonas donde la cantidad de superficie forestal y también el número de incendios por rayo es mayor. A nivel global, es decir considerando el total de las igniciones, se observa como la tendencia es que se concentre un mayor número de igniciones en la zona costera del centro de la región.

Limitaciones y consideraciones futuras

Entre las limitaciones del presente estudio, destaca la no consideración de la evolución temporal de la IUF. Cambios en el uso del suelo, el crecimiento urbano y la transformación de las áreas forestales podrían haber alterado significativamente los patrones de ignición, como sugieren BADI A et al. (2019). Incorporar estas dinámicas en futuros estudios permitirá un análisis más detallado y preciso.

También es relevante incluir la caracterización de las tipologías de IUF, ya que estudios como el de BELTRÁN-MARCOS et al. (2023) han demostrado que la configuración espacial y la fragmentación influyen significativamente en el riesgo de ignición. Además, integrar variables climáticas ayudaría a explicar gran parte de la variabilidad, sobre todo temporal ya que autores como COSTAFREDA-AUMEDES et al. (2016) destacan que si bien la agregación espacial de igniciones tiene más que ver con los patrones del paisaje, la agregación temporal está principalmente condicionada con las variables climáticas y meteorológicas.

6. Conclusiones

Los resultados evidencian la importancia de la interfaz urbano-forestal (IUF) en la probabilidad de ignición. Las igniciones se concentran principalmente en las áreas próximas a la IUF.

El modelo desarrollado mostró un buen desempeño predictivo, alineado con el objetivo de identificar factores clave en la probabilidad de ignición.

La distancia a la IUF se confirmó como un factor relevante en la probabilidad de ignición, con un efecto negativo significativo, lo que enfatiza la importancia de gestionar adecuadamente las áreas cercanas a la interfaz.

Durante el período 2010-2023, el análisis temporal mostró un aumento de la densidad de igniciones en algunas zonas, particularmente en las áreas periurbanas dentro de la IUF. En contraste, fuera de la IUF, las igniciones tendieron a concentrarse en áreas forestales. Estas diferencias significativas entre los patrones de densidad de igniciones dentro y fuera de la IUF, resaltan la importancia de adaptar las estrategias de gestión al contexto territorial específico.

7. Agradecimientos

Los autores agradecen a la Conselleria de Medio Ambiente, Infraestructuras y



Territorio de la Generalitat Valenciana el apoyo al estudio y su disponibilidad.

8. Bibliografía

BADIA, A.; PALLARES-BARBERA, M.; VALLDEPERAS, N.; GISBERT, M.; 2019. Wildfires in the wildland-urban interface in Catalonia: Vulnerability analysis based on land use and land cover change. *Science of the Total Environment* 652: 478–488.

BELTRÁN-MARCOS, D.; CALVO, L.; FERNÁNDEZ-GUISURAGA, J.M.; FERNÁNDEZ-GARCÍA, V.; SUÁREZ-SEONE, S.; 2023. Wildland-urban interface typologies prone to high severity fires in Spain. *Science of the Total Environment* 858: 165000.

CALVIÑO-CANCELA, M.; CHAS-AMIL, M.L.; GARCÍA-MARTÍNEZ, E.D.; TOUZA, J.; 2017. Interacting effects of topography, vegetation, human activities and wildland-urban interfaces on wildfire ignition risk. *Forest Ecology and Management* 402: 380–394.

CHAPPAZ, F.; GANTEAUME, A.; 2023. Role of land-cover and WUI types on spatio-temporal dynamics of fires in the French Mediterranean area. *Risk Analysis* 43: 1056–1072.

CHAS-AMIL, M.L.; TOUZA, J.; GARCÍA-MARTÍNEZ, E.; 2013. Forest fires in the wildland-urban interface: A spatial analysis of forest fragmentation and human impacts. *Applied Geography* 43: 127–137.

COLLINS, B.M.; STEPHENS, S.L.; 2010. Stand-replacing patches within a 'mixed severity' fire regime: quantitative characterization using recent fires in a long-established natural fire area. *Landscape Ecology* 25(6): 927–939.

COSTAFREDA-AUMEDES, S.; COMAS, C.; VEGA-GARCIA, C.; 2016. Spatio-Temporal Configurations of Human-Caused Fires in Spain through Point Patterns. *Forests* 7(9): 185.

GARAY, R.; TAPIA ZARICUE, R.; CASTILLO SOTO, M.E.; 2023. Metodologías de Evaluación de Infraestructura Crítica en zonas de riesgo de Incendios Forestales. Universidad de Chile.

GUTTRIDGE-HEWITT, M.; 2023. Cost of European wildfires counted as UN pleas for climate investment. PSN Network, 22nd September.

MODUGNO, S.; BALZTER, H.; COLE, B.; BORRELLI, P.; 2016. Mapping regional patterns of large forest fires in Wildland-Urban Interface areas in Europe. *Journal of Environmental Management* 172: 112–121.

MADRIGAL, J.; RUIZ, J.A.; PLANELLES, R.; HERNANDO, C.; 2013. Characterization of wildland-urban interfaces for fire prevention in the province of Valencia (Spain). *Montes* 113: 1–15.

MOLINA, J.R.; MARTÍN, T.; RODRÍGUEZ Y SILVA, F.; HERRERA, M.A.; 2016. The ignition index based on flammability of vegetation improves planning in the wildland-urban interface: A case study in Southern Spain. *Landscape and Urban Planning* 149: 99–106.

MORENO, J.M.; VÁZQUEZ, A.; VEGA-GARCÍA, C.; 2021. Los incendios forestales en España ante el cambio climático. En: M. de I. G. y M. de España, ed. *Los incendios forestales en España: Una visión interdisciplinar*, pp. 395–405.

NAKAGAWA, S.; SCHIELZETH, H.; 2013. A general and simple method for obtaining R^2 from generalized linear mixed-effects models. *Methods in Ecology and*



Evolution 4(2): 133–142.

PASTOR, E.; ZAMORA, R.; PLANAS, E.; ARNEDO, A.; 2019. Wildland–Urban Interface Fires in Spain: Summary of the Policy Framework and Recommendations for Improvement. *Fire Technology* 56(8): 1831–1851.

PAUSAS, J.G.; FERNÁNDEZ MUÑOZ, S.; 2012. Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: from fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic Change* 110(1-2): 215–226.

SINGH, S. (2022). Forest fire emissions: A contribution to global climate change. *Frontiers in Forests and Global Change*, 5, 925480
TANG, W.; HE, C.; EMMONS, L.; ZHANG, J.; 2024. Global expansion of wildland-urban interface (WUI) and WUI fires: insights from a multiyear worldwide unified database (WUWUI). *Environmental Research Letters* 19(044028).