



2025 | **16-20**
GIJÓN | **JUNIO**

9º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

9CFE-1958

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

Organiza





Emisiones de Gases de Efecto Invernadero durante Grandes Incendios Forestales: caso de estudio de los eventos extremos de 2012 y 2022 en la Comunidad Valenciana

VAN DEN BERG-SESMA, H. (1), LORENZO SÁEZ, E. (1), LERMA ARCE, V. (1), YAGÜE HURTADO, C. (1) y OLIVER VILLANUEVA, J.V. (1)

(1) Universitat Politècnica de València, ITACA Research Institute. Valencia, España.

Resumen

Desde la década de 1980, a nivel global, se han reducido la cantidad de incendios forestales y el área quemada por estos. Sin embargo, en la cuenca mediterránea, se está produciendo un preocupante auge de los grandes incendios forestales debido al cambio climático. El aumento de las temperaturas, la intensificación de las olas de calor, y los cambios en los patrones de precipitación han derivado en condiciones bioclimáticas que favorecen que los incendios se propaguen rápidamente y sean cada vez más difíciles de controlar. En España, aunque solo el 0,5% de los incendios de 2022 superaron las 500 hectáreas — clasificados como grandes incendios forestales (GIF) —, fueron responsables del 80,8% del área total quemada. Durante los incendios forestales, la combustión de biomasa emite una mezcla compleja de gases, algunos de los cuales son opacos a la radiación infrarroja emitida por la Tierra, contribuyendo al efecto invernadero. En este estudio se han cuantificado las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de cuatro grandes incendios forestales (GIF) en la Comunidad Valenciana que tuvieron lugar en 2012 y 2022. Mediante el uso de una metodología *bottom-up*, que combina datos de biomasa, usos del suelo y severidad del incendio, se calcularon las emisiones de varios tipos de GEI y, posteriormente, se transformaron a CO₂ equivalente. Para analizar los resultados, se empleó el método estadístico *median-split*, que permitió dividir las emisiones en dos categorías: "altas emisiones" y "bajas emisiones". Esto facilitó analizar su relación con la severidad del incendio y el tipo de vegetación afectada. El análisis reveló que las bajas emisiones se asociaron a áreas de baja severidad del fuego y vegetación predominante de matorral, mientras que las altas emisiones estuvieron ligadas a zonas de alta severidad, dominadas por vegetación de masas boscosas de coníferas. Estos resultados no solo subrayan la contribución de los GIF a las emisiones de GEI, sino que también ofrecen claves valiosas para mejorar la gestión del territorio frente a futuros eventos extremos.

Palabras clave

Incendios, severidad, emisiones, tipo vegetación.

1. Introducción

Los incendios forestales son una perturbación natural en muchas regiones del mundo (RESCO DE DIOS et al., 2022), especialmente en los ecosistemas de tipo mediterráneo (MTEs – *Mediterranean-type Ecosystems*) (MOREIRA et al., 2020). Esta



predisposición se debe a su clima característico, con inviernos suaves y húmedos, y veranos cálidos y secos, lo que es particularmente notable en regiones como California (KEELEY Y SYPHARD, 2021), Chile Central (ÚBEDA Y SARRICOLEA, 2016), la cuenca mediterránea (PAUSAS *et al.*, 2008), Sudáfrica (MADONDO *et al.*, 2022) y el sureste de Australia (BOER *et al.*, 2008; Seydi *et al.*, 2021).

En la cuenca mediterránea, los MTEs se han adaptado a los incendios forestales a través de múltiples estrategias evolutivas y mecanismos de renovación de nutrientes (PAUSAS Y VERDÚ, 2005). No obstante, la actividad humana ha alterado los patrones naturales de ocurrencia, incrementando su extensión, intensidad y frecuencia (CHUVIECO *et al.*, 2003). Una de las principales causas de este fenómeno es el abandono de la gestión forestal y la agricultura extensiva desde mitad del siglo XX (DELGADO-ARTÉS *et al.* 2022), especialmente en áreas montañosas. Este abandono ha resultado en la acumulación de combustible y la expansión continuada de grandes masas forestales sin gestión (MOREIRA *et al.* 2011; DELGADO-ARTÉS *et al.* 2022).

Sin embargo, no solo la periodicidad natural y la actividad humana contribuyen a que se produzcan incendios en la cuenca mediterránea. Las condiciones climáticas actuales también juegan un rol significativo, sobre todo en el caso de eventos extremos (CROCKETT Y WESTERLING, 2018; HOLDEN *et al.* 2018). La región mediterránea está situada en una zona de transición entre el clima árido del Norte de África y el clima templado y lluvioso del Centro de Europa. Esta ubicación geográfica la convierte en una región vulnerable frente a modificaciones de la circulación atmosférica general, incluso si se trata de modificaciones menores (GIORGI Y LIONELLO 2008). En consecuencia, las regiones mediterráneas son más vulnerables a los impactos del cambio climático (LIONELLO *et al.* 2006; ULBRICH *et al.* 2006), lo que resulta en sequías más largas, más recurrentes y severas (MUKHERJEE *et al.* 2018). Además, el cambio climático también se ha asociado con una disminución de las precipitaciones en primavera y principios de verano, junto con un aumento de las temperaturas durante todas las estaciones, especialmente en verano (SÁNCHEZ-LAULHÉ OLLERO *et al.*, 2020). Estas condiciones favorecen la ignición y extienden la temporada de incendios (NOAA, 2023; RODRIGUES *et al.*, 2023), con un incremento promedio de una semana en la duración de esta temporada en la mayoría de los países (EL GARROUSSI, 2024). Además, se observa una creciente presencia de incendios en sistemas donde históricamente no ocurrían (BOER *et al.*, 2021).

Los bosques, en condiciones óptimas, actúan como sumideros de carbono y ayudan a mitigar el cambio climático. No obstante, la deforestación y el calentamiento global pueden provocar que lleguen a puntos de inflexión: los biomas forestales más grandes y preservados que son sumideros netos de carbono pueden convertirse en fuentes netas de carbono, liberando miles de millones de toneladas de carbono almacenado (WWF, 2020). La combustión de biomasa durante los GIFs emite una mezcla compleja de gases y aerosoles, pero la mayor parte del carbono emitido se libera como CO₂, CO y CH₄ (URBANSKI, 2014). La proporción de cada compuesto depende de múltiples variables, como el tipo de vegetación, la cantidad de combustible y las condiciones específicas de combustión, que pueden variar considerablemente en el espacio y el tiempo (ANDREAE Y MERLET, 2001). Además, algunas de estas sustancias, como el CO₂ y el CH₄, son opacas a la radiación infrarroja emitida por la Tierra, contribuyendo al efecto invernadero (BARDOS Y PIRONNEAU, 2022) y, por tanto, al cambio climático.



El cambio climático está poniendo en jaque los avances que se estaban logrando desde la década de 1980. A pesar de que a nivel global la tendencia general es de disminución del número de incendios y del área quemada, en algunas regiones como la mediterránea, se está produciendo un aumento de los GIF (WWF, 2020). En el sur de Europa, en 2022, tanto el número total de incendios como el tamaño promedio de estos superaron los promedios de las últimas cuatro décadas (EFFIS, 2023). Las condiciones cálidas y secas contribuyeron a incendios generalizados, particularmente en España, Portugal y Francia (RODRIGUES *et al.*, 2023). En 2022, en España, los GIF, que son aquellos que superan las 500 hectáreas quemadas (MITECO, 2021), representaron el 80,8 % de la superficie quemada total —el porcentaje más alto de la década—, pero fueron apenas el 0,5 % del número total de incendios ocurridos ese año (EFFIS, 2023).

Por ello, disponer de una metodología que mida las emisiones generadas durante un incendio forestal permitiría la evaluación del impacto final de estos eventos en el cambio climático, los ecosistemas y la salud de las personas, tanto en las poblaciones cercanas como en aquellas más distantes, dependiendo de las condiciones meteorológicas, también poniéndolas en contexto y comparación con las principales fuentes de emisiones de GEI de origen antrópico (industria, energía, transporte, residuos, etc.)

2. Objetivos

El objetivo principal de la investigación es cuantificar y analizar las emisiones de GEI emitidas por cuatro GIF ocurridos en la Comunidad Valenciana durante 2012 y 2022.

Para abordar este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

1. Cuantificar las emisiones de GEI de los GIF de Andilla (2012), Cortes de Pallás (2012), Bejís (2022) y Vall d'Ebo (2022), utilizando una metodología *bottom-up* basada en datos de biomasa, usos del suelo y severidad del incendio.
2. Analizar la relación entre el tipo de vegetación, la severidad del incendio y las emisiones de GEI, identificando patrones específicos.
3. Comparar las emisiones de los GIF con otras fuentes de emisión a nivel local y nacional.

3. Metodología

Se ha utilizado una metodología *bottom-up* para calcular las emisiones GEI de los GIF. Esta metodología se basa en datos de biomasa preexistente, usos del suelo y severidad del incendio.

3. 1. Área de estudio

Se han estudiado cuatro GIF que tuvieron lugar en la Comunidad Valenciana (Figura 1). Dos ocurrieron en junio de 2012 (el GIF de Andilla que quemó 20.439 ha y el GIF Cortes de Pallás que quemó 28.307 ha). Ocurrieron en un mes excepcionalmente cálido y seco que tuvo una temperatura media de 22,7°C, una

anomalía de +2,6°C sobre la media de este mes (AEMET 2012). Diez años después, en verano de 2022, los incendios forestales volvieron a azotar con dureza la Comunidad Valenciana. En agosto se producen el GIF de Bejís, con 17.709 ha quemadas, y el GIF de Vall d'Ebo con 11.062 ha quemadas. El verano de 2022 fue el más cálido desde que se tienen registros (desde 1961), con una anomalía de temperatura media de +2.2°C. A pesar de que la media de precipitación de agosto fue normal para el conjunto de España, algunas áreas del este y sur de la Península Ibérica experimentaron condiciones áridas. En la Comunidad Valenciana, la precipitación fue inferior al 75% de la media entre 1981 y 2010 (AEMET 2023).

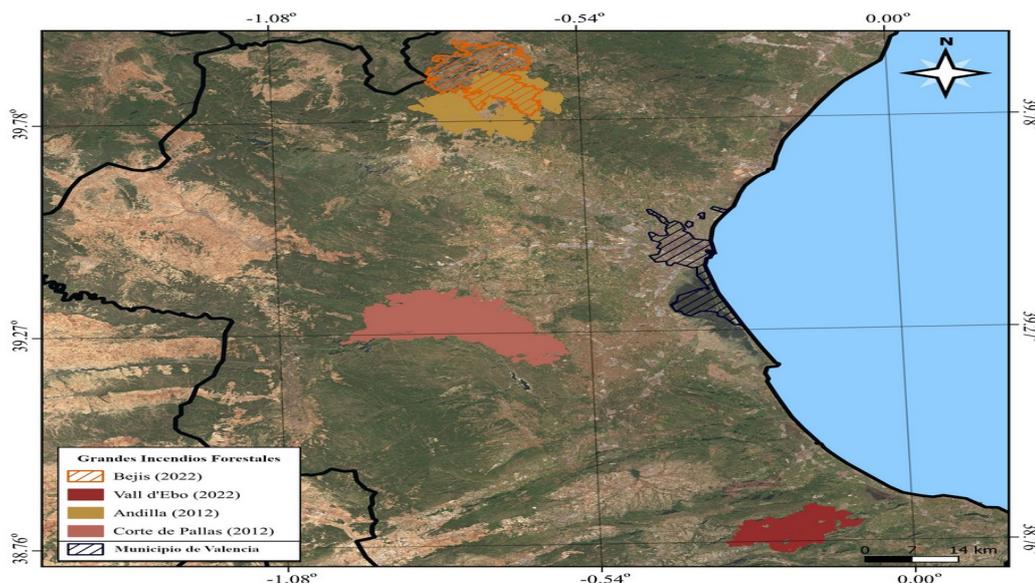


Figura 1. Localización de los grandes incendios forestales en la Comunidad Valenciana en 2012 y 2022

3.2. Cuantificación de la biomasa preexistente

Para estimar la biomasa disponible en el área quemada antes del incendio se ha seguido la metodología para MTEs descrita por Lerma-Arce et al. (2020). Esta metodología asigna un valor específico de toneladas de biomasa por hectárea según el uso del suelo forestal o agrícola, diferenciado para cada provincia de la Comunidad Valenciana. Se aplicó a los usos del suelo del modelo de datos SIOSE (SIOSE 2015).

Para los GIF de 2012, se aplicaron los valores de biomasa por hectárea al conjunto de datos de SIOSE de 2011. Sin embargo, como el último conjunto de datos de SIOSE es de 2014, para los incendios forestales de 2022 los valores de biomasa debían ser actualizados. Esta actualización se llevó a cabo aplicando los valores anuales de incremento de biomasa proporcionados por el IFN3 (MITECO 2006) para calcular la biomasa en 2022. Los incrementos se aplican a los usos del suelo forestales y no se aplican a los usos del suelo agrícolas, ya que se asume que el crecimiento anual de los cultivos leñosos agrícolas se poda por lo general (Lerma-Arce et al. 2020).

La cantidad de biomasa quemada se determinó en función de la severidad del



incendio y del tipo de vegetación (matorral, bosque de coníferas o bosque de frondosas), utilizando valores de consumo adaptados del trabajo de De Santis et al. (2010).

3.3. Cálculo de la severidad del incendio a partir del índice NBR

En primer lugar, se ha calculado el índice NBR (*Normalized Burned Ratio*) (KEY Y BENSON, 2006) para antes y después de la fecha de cada uno de los GIF. Tras calcular el NBR pre-incendio y post-incendio para cada GIF, se ha calculado la diferencia (Δ NBR). La severidad de un incendio está directamente relacionada con la diferencia entre valores de NBR de dos fechas distintas; una mayor diferencia indica mayor severidad. En la tabla 5 se especifican los rangos con los que se han clasificado los valores de Δ NBR, siguiendo lo establecido en el manual de USDA (KEY Y BENSON, 2006).

Tabla 1. Rangos de valores de Δ NBR para la clasificación de severidad

Δ NBR	Clase severidad
-500 – 100	No quemado
101 – 269	Baja
270 – 439	Moderada
440 – 659	Alta
660 – 1300	Extrema

3.4. Combinación de variables

La capa ráster clasificada en niveles de severidad se transformó a polígonos y se unió a la capa de biomasa preexistente y a la de tipo de vegetación, ambas derivadas del SIOSE. De este modo, cada zona incendiada cuenta con una capa vectorial en la que cada polígono ofrece información de la severidad del incendio, el tipo de vegetación presente en esa zona y la cantidad de biomasa preexistente.

3.5. Cálculo de la biomasa consumida

Una vez se cuenta con las tres variables requeridas, se calcula la biomasa quemada aplicando porcentajes de consumo (tabla 2) extraídos del trabajo realizado por Chaves-Naharro (2014). Este trabajo adaptó los valores de De Santis et al. (2010) de clima mediterráneo californiano a las condiciones bioclimáticas del este de España.

Tabla 2. Porcentaje de biomasa consumida por clase de severidad y tipo de vegetación (Chaves-Naharro, 2014)

Clase severidad	Matorral	Bosque de coníferas	Bosque de frondosas
-----------------	----------	---------------------	---------------------

Baja	0,71	0,25	0,25
Moderada	0,84	0,47	0,40
Alta	0,89	0,56	0,48
Extrema	0,95	0,65	0,56

La biomasa consumida (FC) se calculó mediante la Ecuación 1:

$$FC = Bi \times Ci \quad (1)$$

Donde FC es la fracción de biomasa consumida, Bi es la biomasa preexistente en la unidad espacial ($t \times ha^{-1}$) y Ci es el porcentaje (%) correspondiente de consumo de biomasa basado en la severidad del incendio y el tipo de vegetación presente en la unidad espacial.

3. 6. Factores de emisión

Se han extraído los factores de emisión de estudios de modelización realizados en Portugal, donde ocurrieron GIF en 2009 (ALVES *et al.* 2011) y 2010 (EVTYUGINA *et al.* 2013). También consideramos un experimento realizado en la Sierra de Lousã (ALVES *et al.* 2010). Seleccionamos estos factores de emisión debido a la proximidad relativa al área de estudio. Además, revisamos estudios recientes centrados en combustibles americanos (FERNANDES *et al.* 2022). Finalmente, utilizamos los siguientes factores de emisión (FE): $1.377 \text{ gCO}_2 \times \text{kg}^{-1}$ de biomasa seca, $1,4 \text{ gCH}_4 \times \text{kg}^{-1}$ de biomasa seca y $0,12 \text{ gN}_2\text{O} \times \text{kg}^{-1}$ de biomasa seca.

Se calculan la cantidad de emisiones de cada GEI en toneladas según la ecuación 2:

$$Ex (Tn \text{ gas}) = FC \times FE \times (1Tn/1000g) \quad (2)$$

Donde Ex son las toneladas emitidas por un gas en particular, FC es la fracción de biomasa consumida, FE el factor de emisión correspondiente al gas y, por último, se aplica una conversión a toneladas.

3.7. Cálculo de emisiones de CO₂ equivalente

Finalmente, transformamos la cantidad total de emisiones de GEI a dióxido de carbono equivalente (CO_{2eq}). Basamos este cálculo en el informe AR5 del IPCC (IPCC 2014), que considera el potencial de calentamiento global (GWP, por sus siglas en inglés) de los gases como una función de su capacidad de forzamiento radiativo relativa al CO₂.

Se calcula el CO_{2eq} según la ecuación 3:

$$CO_{2eq} = Ex \times GWP \quad (3)$$

Donde, CO_{2eq} es el total de toneladas de dióxido de carbono equivalente, Ex es la cantidad en toneladas de cada emisión parcial, y GWP es el Potencial de Calentamiento Global de cada gas.

4. Resultados

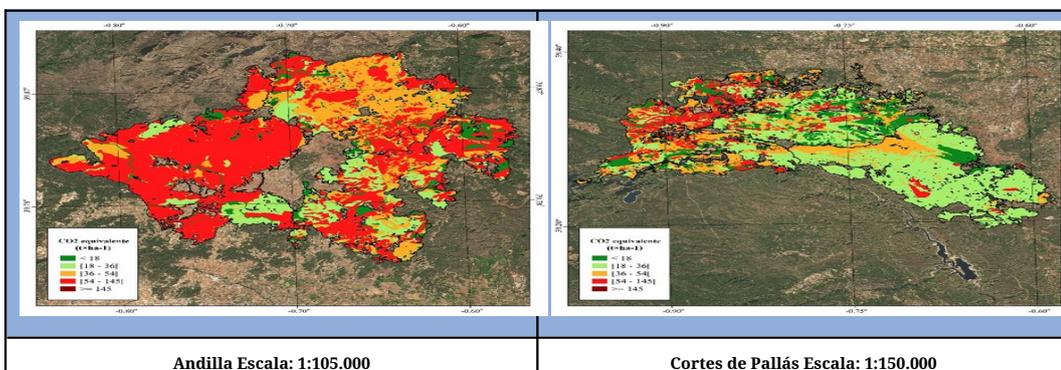
4.1. Cuantificación de las emisiones de los GIFs

Los grandes incendios forestales (GIF) de 2012 emitieron más GEI que los de 2022 (Tabla 3). El incendio de Andilla fue el que generó la mayor cantidad de emisiones, siendo el único GIF analizado cuyas emisiones de CO₂ equivalentes superaron el millón de toneladas (1.219,197 kt de CO_{2eq}). Por su parte, Bejís (962,312 kt de CO_{2eq}) y Cortes de Pallás (951,573 kt de CO_{2eq}) tuvieron emisiones similares a pesar de presentar características distintas. Vall d'Ebo fue el evento con menores emisiones entre los analizados (469,944 kt de CO_{2eq}).

El CO₂ fue el gas más emitido debido a su alto factor de emisión (1.377 gCO₂×kg⁻¹ de biomasa seca), mientras que CH₄ (1,4 gCO₂×kg⁻¹) y N₂O (0,12 gCO₂×kg⁻¹) se emitieron en menor cantidad. En todos los gases, Andilla fue el mayor emisor, seguido por Bejís, Cortes de Pallás y Vall d'Ebo.

Tabla 3. Emisiones GEI totales (kt) de cada GIF

GIF	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	TOTAL CO _{2eq}
Andilla	915,894	0,932	0,079	1.219,197
Cortes de Pallás	714,848	0,726	0,062	951,573
Bejís	722,915	0,734	0,063	962,312
Vall d'Ebo	353,035	0,360	0,031	469,944



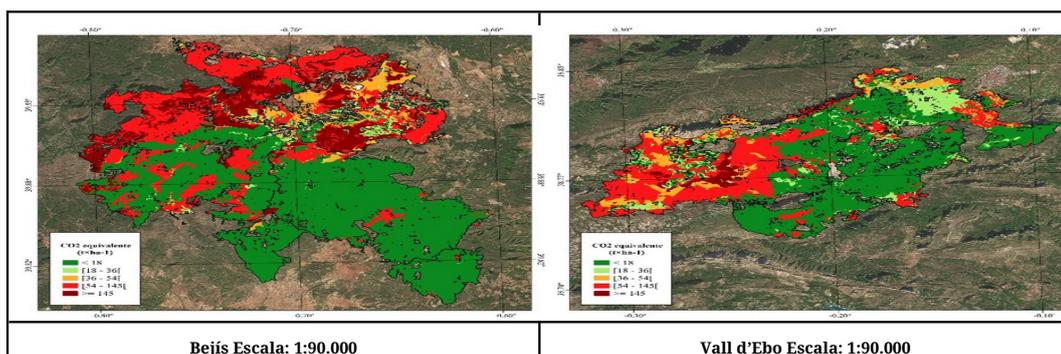


Figura 2. Emisiones de CO_{2eq} por hectárea de los GIF de a) Andilla, b) Corte de Pallás, c) Bejís y d) Vall d'Ebo

Tabla 4. Mediana emisiones GEI por hectárea ($t \times ha^{-1}$) de cada GIF de las

GIF	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	ToTAL CO _{2eq}	DESVEST CO _{2eq}
Andilla	43,168	0,044	0,004	57,475	28,96
Corte de Pallas	22,283	0,022	0,001	29,668	15,94
Bejís	10,131	0,010	0,0008	13,489	63,27
Vall d'Ebo	12,861	0,013	0,001	17,123	40,63

Cuando se analizan las emisiones por hectárea (Figura 2 y tabla 4), Andilla se mantiene como el incendio más emisoro con una mediana de 57,48 t CO_{2eq}×ha⁻¹. Le siguen Cortes de Pallás (29,66 t CO_{2eq}×ha⁻¹) y Vall d'Ebo (17,12 t CO_{2eq}×ha⁻¹), mientras que Bejís tuvo la mediana más baja (13,49 t CO_{2eq}×ha⁻¹). En general, los GIF de 2012 mostraron mayores emisiones por hectárea que los de 2022. Como se observa en el caso de los incendios de 2022, la desviación estándar supera a su mediana y además es más alta que en los casos de 2012, por ello se ha seleccionado la mediana para describir los valores por hectárea, ya que se trata de medida de tendencia central que funciona mejor ante distribuciones sesgadas con valores extremos.

Para simplificar la comparación entre incendios se calculó la mediana de todos los valores de CO_{2eq} por hectárea de los cuatro GIF. El resultado fue 35,99 tCO_{2eq}×ha⁻¹, valor que se empleó como umbral para categorizar las emisiones de todos los incendios estudiados y que permite identificar de manera clara los incendios con mayor intensidad relativa. Solo Andilla superó este valor, con el 77,5% de su área quemada clasificada como de “altas emisiones”. En contraste, Bejís tuvo solo el 0,42% de su área en esta categoría. Vall d'Ebo y Cortes de Pallás presentaron proporciones intermedias (38,0% y 36,0%, respectivamente).

4.2. Análisis entre tipo de vegetación, severidad y emisiones

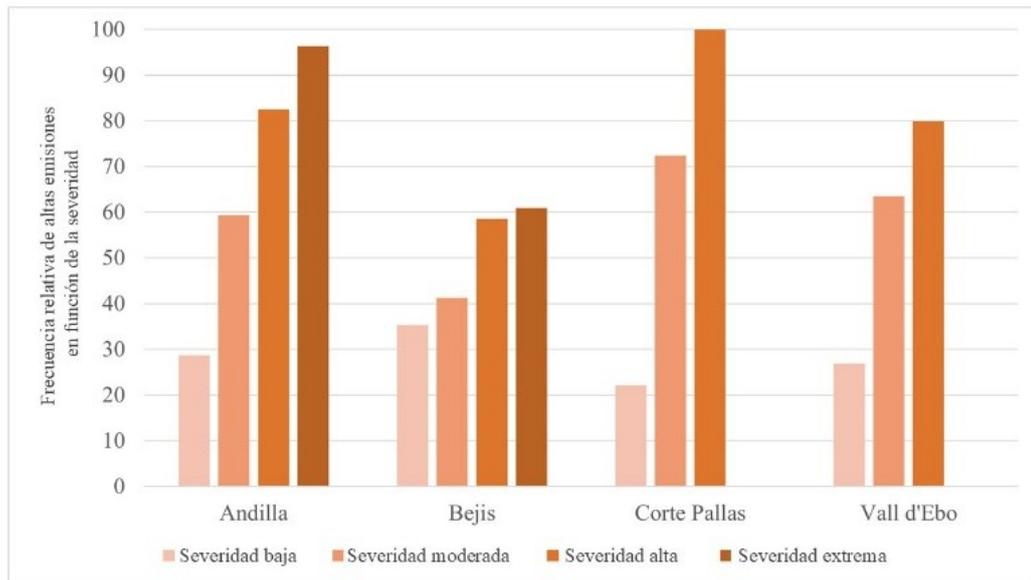
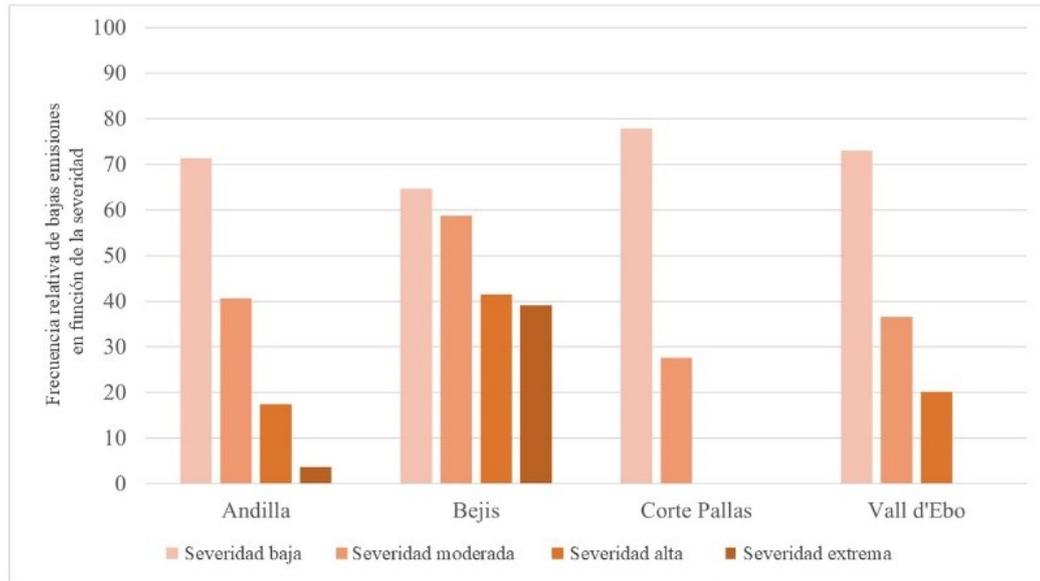


Figura 3. Frecuencia relativa de bajas y altas emisiones según el nivel de severidad del incendio

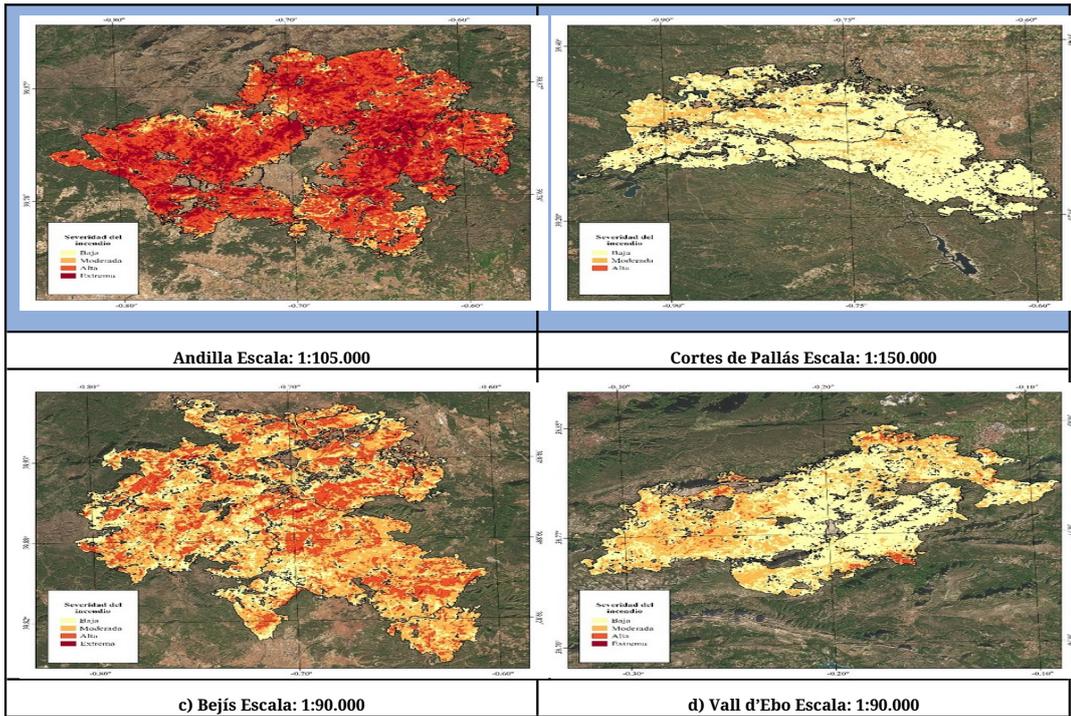
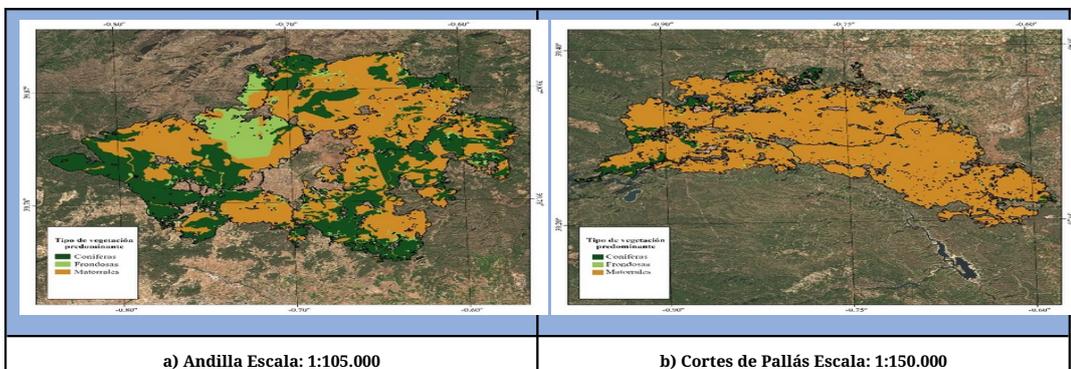


Figura 4. Severidad de los GIF de a) Andilla, b) Corte de Pallás, c) Bejís y d) Vall d'Ebo

El tipo de vegetación (figura 5) también influye en las emisiones y la severidad del fuego. Las zonas de baja y moderada severidad se han asociado predominantemente con áreas de matorral, mientras que las de alta severidad se concentran mayoritariamente en masas boscosas de coníferas. Las masas de frondosas no muestran un patrón tan distintivo; sin embargo, existe una ligera mayor ocurrencia de baja severidad del fuego (13,1%) en estas áreas. Esta proporción disminuye a medida que aumenta la severidad del fuego: moderada (11,6%), alta (10,0%) y extrema (5,6%). La Figura 6 muestra los tipos de vegetación de cada GIF.



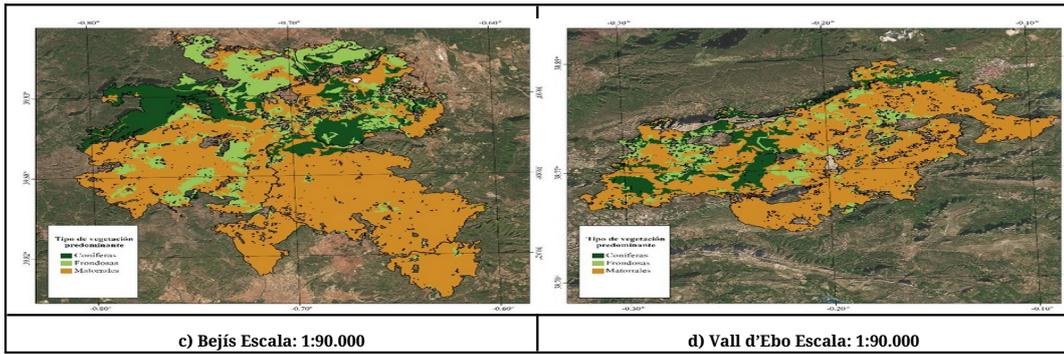


Figura 5. Distribución de los tipos de vegetación en cada GIF a) Andilla, b) Corte de Pallás, c) Bejís y d) Vall d'Ebo

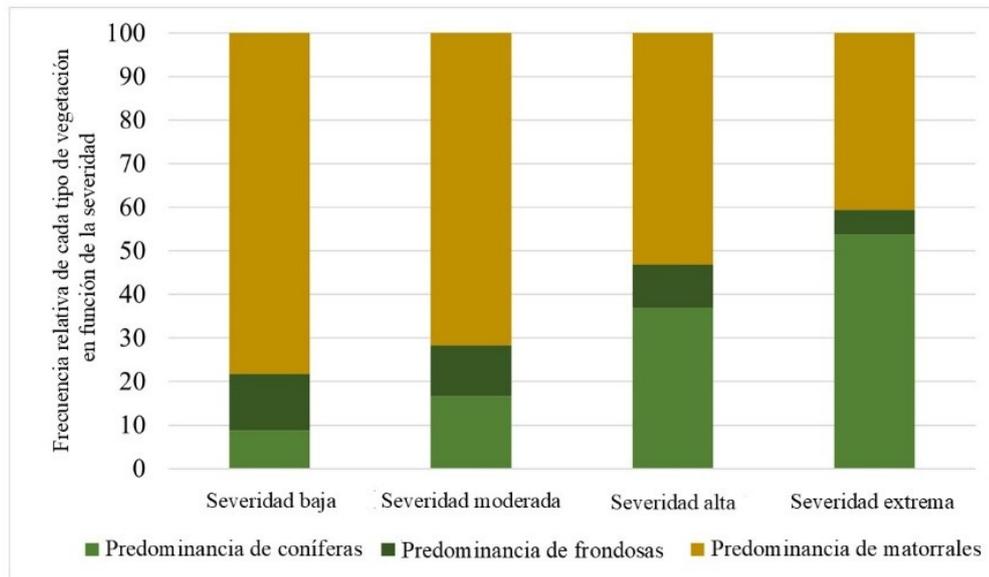


Figura 6. Frecuencia relativa del tipo de vegetación según el nivel de severidad del incendio

Las bajas emisiones se relacionan predominantemente con zonas de matorral (Figura 7). En cambio, las altas emisiones se asociaron con bosques de coníferas. Los bosques de frondosas se distribuyeron tanto en zonas de altas como bajas emisiones. El GIF de Andilla destaca por tener un consumo considerable de matorral tanto en las zonas de bajas como de altas emisiones, pero en las zonas de altas emisiones la vegetación predominante es el bosque de coníferas.

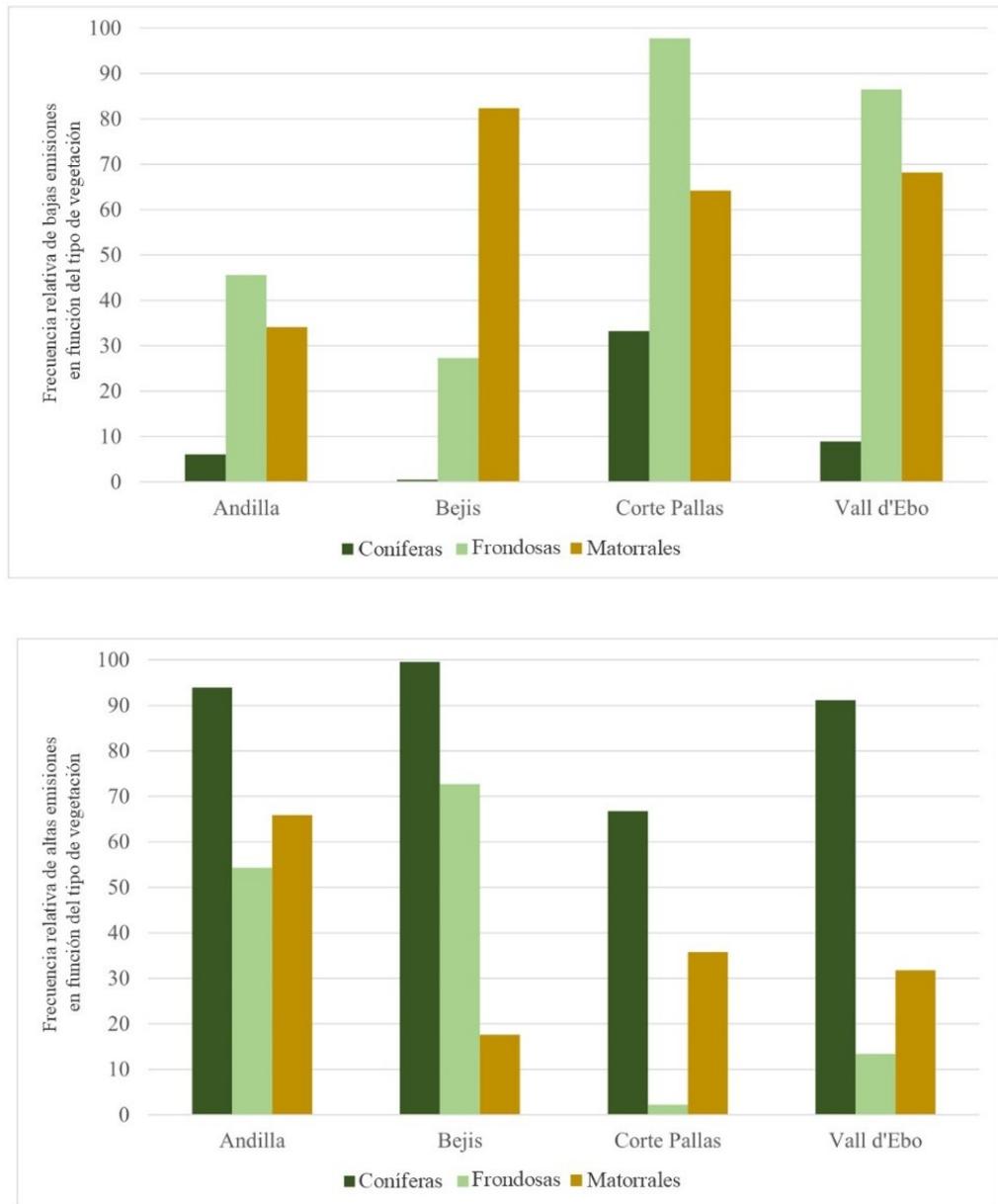


Figura 7. Frecuencia relativa de bajas y altas emisiones según el tipo de vegetación

Si en lugar de tomar el umbral para diferenciar entre “altas” y “bajas” emisiones, calculamos los percentiles de las emisiones de $\text{CO}_{2\text{eq}} \times \text{ha}^{-1}$, se obtienen resultados más detallados de cómo los diferentes tipos de vegetación contribuyen a las emisiones. El matorral (Figura 8) muestra una correlación negativa con las emisiones, evidenciada por un coeficiente de Pearson de $r = -0,58$. El modelo de regresión lineal alcanza un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,315$, lo que indica que el modelo solo explica una proporción moderada de la variabilidad de las $\text{tCO}_{2\text{eq}} \times \text{ha}^{-1}$.

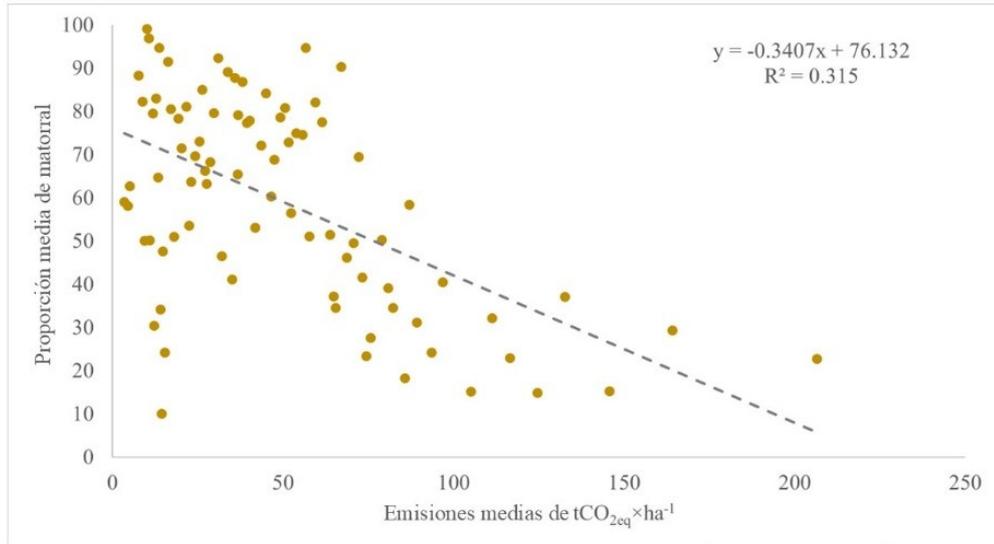


Figura 8. Relación entre las emisiones medias por hectárea y el porcentaje de ocupación de matorral

Los bosques de frondosas (Figura 9) exhiben una correlación mínima (el coeficiente de Pearson es $r = 0,07$) con las emisiones, lo que sugiere que no existe relación lineal entre las variables. El modelo de regresión lineal correspondiente da un $R^2 = 0,02$, lo que indica que este tipo de vegetación no explica la variabilidad de las emisiones.

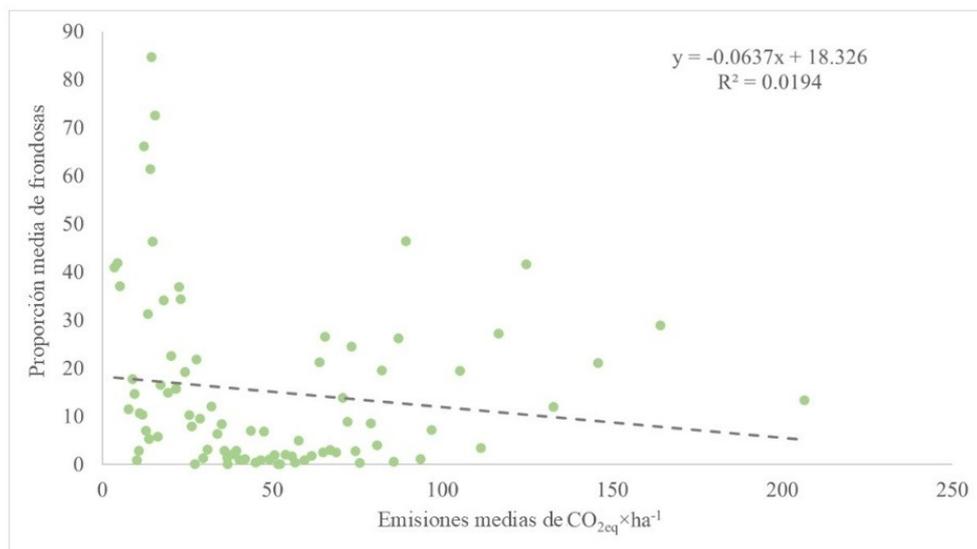


Figura 8. Relación entre las emisiones medias por hectárea y el porcentaje de ocupación de frondosas

Los bosques de coníferas muestran una correlación positiva (el coeficiente de Pearson entre las dos variables fue de $r = 0,59$) con las emisiones. El modelo de regresión lineal entre la ocupación promedio de las coníferas y la cantidad de $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$ emitidos presentó una línea de tendencia con una pendiente

ascendente, con $R^2 = 0,35$. Sin embargo, al excluir el valor máximo (percentil 100), el modelo de regresión lineal para los bosques de coníferas mejora considerablemente. La Figura 9 muestra el resultado cuando se excluye el percentil 100 de las emisiones $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$, revelando un $R^2 = 0,52$ y un coeficiente de Pearson de $r = 0,72$, lo que significa que el modelo explica en gran medida la relación de las emisiones $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$ con el consumo de vegetación de coníferas durante incendios forestales.

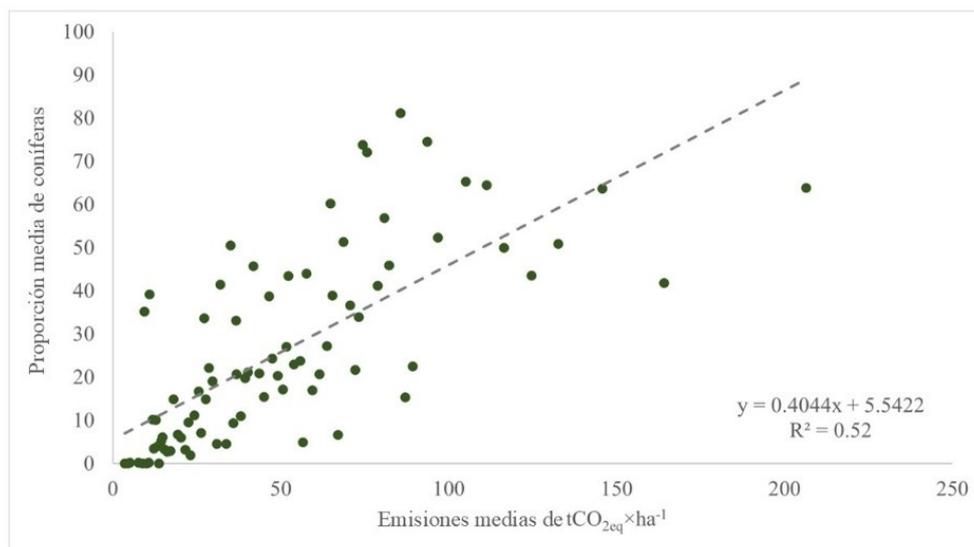


Figura 8. Relación entre las emisiones medias por hectárea y el porcentaje de ocupación de coníferas

5. **Discusión** Este estudio cuantifica las emisiones de GEI y analiza cómo la presencia de determinados tipos de vegetación y la severidad de los incendios influyen en las emisiones de GEI. Se han estudiado cuatro GIF de una región representativa de la cuenca del Mediterráneo, la Comunidad Valenciana. 5.1 Cuantificación de las emisiones de los GIFs Chaves-Naharro (2014) también estimó las emisiones para los GIF de Andilla y Cortes de Pallás. En el caso de Andilla, Chaves-Naharro (2014) estimó que se emitieron 797.735 tCO_{2eq} , mientras que, en este estudio, este valor asciende a 1.219.197 tCO_{2eq} . Esto significa que las emisiones totales serían un 52,0% más altas en nuestro caso. Desde la perspectiva de toneladas por hectárea, Chaves-Naharro (2014) calculó el promedio, mientras que en nuestra investigación se seleccionó la mediana como la estadística descriptiva para resumir los valores por hectárea de los incendios. No obstante, para esta comparación, se ha calculado el promedio. En Chaves-Naharro (2014), el promedio para Andilla fue de 38,09 $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$. En nuestro caso, el promedio fue de 58,99 $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$. Esto representa un aumento del 14,0% en el promedio. En el caso de Cortes de Pallás, Chaves-Naharro (2014) estimó que se emitieron 675.759 tCO_{2eq} , mientras que, en este estudio, este valor asciende a 951.573 tCO_{2eq} , lo que significa que el incendio forestal habría emitido un 40,0% más. Desde la perspectiva de toneladas por hectárea, en



Chaves-Naharro (2014), el promedio para Cortes de Pallás fue de 22,71 $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$. En nuestro caso, el promedio fue de 33,60 $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$. En promedio, las emisiones por hectárea fueron un 48,0% más altas en nuestro caso. Esta diferencia parece estar asociada a los datos de biomasa preexistente utilizados. Existen dos distinciones principales entre los dos estudios. En primer lugar, en Chaves-Naharro (2014), la biomasa se calculó utilizando ecuaciones alométricas (basadas en el IFN3) aplicadas a las diversas especies presentes en el área quemada. En nuestro estudio, sin embargo, se empleó un valor promedio de biomasa por hectárea a diferentes usos del suelo derivados de la cartografía SIOSE. La otra disparidad entre los dos estudios radica en que Chaves-Naharro (2014) solo incluyó especies forestales en los cálculos, mientras que nuestro estudio también incluyó especies agrícolas leñosas, lo que aumentó la cantidad de biomasa quemada por los GIF. Una observación de interés es la diferencia entre las medianas de las emisiones por hectárea de cada incendio, así como la diferencia entre estas medianas y la mediana de los valores de todos los incendios combinados. Esta variabilidad podría estar relacionada con las diferencias en la magnitud o las condiciones específicas de cada GIF, y no necesariamente indica una anomalía en la distribución de datos. Sin embargo, los GIF de Bejís y Vall d'Ebo tienen valores máximos de emisiones equivalentes de CO_2 por hectárea que superan a los incendios de 2012. Por ejemplo, el máximo de $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$ de Bejís (325,85 $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$) supera al de Andilla (144,8 $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$) en un 125,03%, a pesar de que ambos incendios ocurrieron en zonas geográficas cercanas. Esto indica la posibilidad de que en los incendios de 2022 puede haber valores atípicos. Para facilitar la comparación entre los incendios y establecer un criterio uniforme, se calculó la mediana combinada de las emisiones por hectárea de los cuatro incendios. Las emisiones superiores a 35,99 $tCO_{2eq} \times ha^{-1}$ se clasificaron como “altas emisiones”, mientras que las inferiores a este valor como “bajas emisiones”. Farrington y Loeber (2000) sugieren que el uso de un enfoque basado en la mediana para categorizar variables puede ser útil cuando las distribuciones están sesgadas, especialmente cuando no existe una relación lineal con los resultados.

5.2. Análisis entre tipo de vegetación, severidad y emisiones Dado que cada incendio forestal se comporta de manera diferente, el objetivo fue identificar tendencias generales que puedan caracterizar las emisiones asociadas con los GIF en la región mediterránea. Para lograrlo, se analizaron las variables que formaban parte de la metodología, con el fin de identificar las características de severidad del incendio y el tipo de vegetación que coincidían con zonas de altas o bajas emisiones. Este enfoque permitió determinar las correlaciones entre las emisiones y los factores que influyen en las características particulares de cada incendio. Además, anticipar las condiciones asociadas con el cambio climático es un desafío científico clave con implicaciones fundamentales para la gestión actual y futura de incendios, los ecosistemas y el bienestar humano (Duane, 2021). La clasificación de la vegetación de los MTEs (bosque de coníferas, bosque de frondosas, matorral) no implica una cobertura uniforme a lo largo de un área, lo que complica la predicción de la severidad del incendio y de las emisiones a partir de una clasificación general de la vegetación. Además, la variabilidad en la composición y distribución de la vegetación puede dar lugar a patrones de incendios más complejos y menos



predecibles que en otros ecosistemas forestales más homogéneos. No obstante, mientras que la presencia de matorral y bosque de frondosas no parecen ser variables explicativas de las emisiones, destacan los resultados obtenidos para los bosques de coníferas, que, para todos los incendios, generan altas emisiones y alta severidad. Estos resultados sugieren que las masas boscosas de coníferas representan un punto crítico en la gestión de incendios y la reducción de emisiones. Dado que estos bosques están asociados con alta severidad y emisiones, es crucial desarrollar estrategias específicas de gestión forestal para mitigar los efectos de los incendios en estas áreas. Es fundamental que cualquier estrategia de gestión se base en un monitoreo continuo y en la evaluación de las condiciones locales para adaptarse a las variaciones en la composición y estructura de los MTEs. En este sentido, los bosques de coníferas podrían servir como un punto de inicio para establecer políticas más amplias de gestión forestal y restauración ecológica con el objetivo de reducir tanto la severidad de los incendios como las emisiones de gases contaminantes.

5. 3. Comparación con otras fuentes emisoras de GEI a) a nivel nacional

La comparación con las principales fuentes de emisiones de GEI (energía, industria, agricultura, gestión de residuos), es clave para contextualizar la relevancia las emisiones procedentes de incendios forestales a nivel nacional. Se ha consultado el Inventario Nacional de GEI en España (MITECO 2024). La Tabla 5 ilustra la comparación de las emisiones de GEI de los GIF y las emisiones totales de GEI de España calculadas para los años 2012 (basado en datos de 2010) y 2022 (basado en datos de 2021).

Tabla 5. CO_{2eq} total (kt) antrópico por sector

Año	Energía	Industria	Agricultura	Residuos	Total	GIF
2022	216.048	24.127	34.369	14.303	288.847	(Bejis y Vall d'Ebo) 1.433
2012	265.607	39.094	33.208	16.740	354.652	(Andilla y Corte de Pallas) 2.171

En 2012, los dos GIF analizados (Andilla y Cortes de Pallás) representaron un total de emisiones de 2.171.174 tCO_{2eq}, abarcando tanto áreas forestales como agrícolas. Si se incluyeran en el total nacional de emisiones, estos GIF representarían el 0.6% de las emisiones totales de CO_{2eq} en toda España. En comparación con algunas de las principales actividades humanas, emitieron aproximadamente el 13,0% de las actividades de gestión de residuos, un 6,5% de la agricultura, un 5,5% de las actividades industriales y un 0,8% de las actividades relacionadas con la energía. Por lo tanto, aunque los GIF no son tan emisivos como otros grupos de actividades, sí suponen una gran cantidad de gases emitidos a la atmosfera en un corto periodo de tiempo. Además, sí que emitieron más que algunas actividades específicas,



como la quema de biomasa residual agrícola (los incendios fueron 155 veces más emisivos) y la incineración al aire libre y quema de residuos sólidos (los incendios fueron 3 veces más emisivos).

En 2022, las emisiones totales de GEI a nivel nacional fueron de 1,432,522 tCO_{2eq}. Si se incluyeran en el total de emisiones nacional, solo estos dos GIF habrían representado el 0,5% de las emisiones totales nacionales. Los GIF de 2022 habrían representado el 10,0% de las actividades relacionadas con la gestión de residuos, el 4,0% de la agricultura, el 6,0% de las emisiones de la industria y solo el 0,7% de las actividades relacionadas con la energía. Similar al caso de 2012, algunas actividades específicas emiten mucho menos que los GIF. La quema de biomasa residual agrícola en el campo fue 55 veces menos emisiva que los dos GIF de 2022 en la Comunidad Valenciana, y la incineración al aire libre y quema de residuos sólidos fueron dos veces menos emisivos.

b) a nivel local

La magnitud real se observa también al comparar el total de emisiones de los GIF con niveles de emisiones a nivel local. Las emisiones de GEI de los dos GIF de 2012 fueron un 16,0% superiores a las emisiones anuales totales de GEI provenientes de todas las actividades en la ciudad de Valencia, según el inventario de emisiones de GEI del Plan de Acción para la Energía Sostenible y el Clima (Ajuntament de València, 2021). Según la misma fuente, las emisiones de GEI de los dos GIF de 2022 son equivalentes a las emisiones combinadas de los sectores residencial, industrial y de transporte privado en la ciudad de Valencia para ese año.

6. Conclusiones

Este estudio utilizó una metodología de alta resolución para cuantificar las emisiones de GEI generadas durante incendios forestales extremos en la Comunidad Valenciana. Se combinaron datos de biomasa preexistente, severidad del incendio (calculada mediante el índice NBR) y el tipo de vegetación presente, para determinar la biomasa consumida y aplicarle los correspondientes factores de emisión para cada gas estudiado. Esta aproximación bottom-up permitió estimar las emisiones de cada GIF y analizar las relaciones entre vegetación, severidad y emisiones.

En 2012, la cuantificación de emisiones de CO_{2eq} asciende a 2.171.174 tCO_{2eq}. Las emisiones de Andilla fueron 1.219.198 tCO_{2eq} mientras que las de Corte de Pallás fueron de 951.574 tCO_{2eq}. En 2022, las emisiones de CO_{2eq} en total, de los dos GIF estudiados ascendieron a 1.432.522 tCO_{2eq}, de las cuales 962.312 tCO_{2eq} procedieron del GIF de Bejís y 469.944 tCO_{2eq} del GIF de Vall d'Ebo.

Las características variaron considerablemente entre incendios teniendo cada uno de ellos una severidad y una estructura de la vegetación diferente. Por ello, el uso del método estadístico *median-split* permitió categorizar las emisiones para facilitar la comparación entre incendios. Como umbral para separar entre altas y bajas emisiones fue la mediana de los valores de CO_{2eq}·xha⁻¹ de todos los incendios combinados, lo que dio un resultado de 35,99 tCO_{2eq}·xha⁻¹. También se calcularon el resto de los percentiles para obtener el comportamiento detallado de las emisiones



en relación con la proporción presente de cada tipo de vegetación.

Los resultados mostraron que:

- A mayor presencia de matorral las emisiones por hectárea suelen ser bajas.
- A mayor presencia de coníferas las emisiones por hectárea suelen ser altas.
- La presencia de frondosas no es una variable claramente descriptiva de las emisiones por hectárea.

La comparación con otras fuentes de emisión resalta la necesidad de tener en cuenta las emisiones procedentes de incendios forestales (sobre todo de los GIF), especialmente a escala local, ya que estos eventos pueden generar emisiones equivalentes a las que se producen por actividad antrópica, p. ej. en una ciudad entera durante un año. Una cantidad tan elevada de emisiones en un periodo de tiempo tan corto tiene impacto directo en la población y en el medio ambiente, demostrando que es fundamental implementar medidas preventivas y de mitigación para reducir su frecuencia y magnitud. Los bosques de coníferas pueden ser punto de inicio para su gestión y que así puedan seguir siendo sumideros de carbono y no convertirse en fuente de emisiones.

7. Agradecimientos

Queremos expresar nuestro más sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron al éxito de este estudio. En particular, agradecemos la asistencia financiera proporcionada por el Proyecto Horizon Europe INFORMA (GA No. 101060309).

8. Bibliografía

AEMET; 2012. “Resumen Anual Climatológico”. Accessed September 30, 2024. <https://repositorio.aemet.es/handle/20.500.11765/1011>

AEMET; 2023. “2022, El año más cálido en España”. Accessed September 30, 2024. https://www.aemet.es/es/noticias/2023/01/resumen_anual_2022

AJUNTAMENT DE VALÈNCIA; 2021. “Plan de Acción para el Clima y la Energía Sostenible de la Ciudad de València”. Accessed September 30, 2024. https://mycovenant.eumayors.eu/storage/web/mc_covenant/documents/8/48ag3EGWJeCioQJYbwyDBMASiAI8Maq6.pdf

ALVES, C.A.; GONÇALVES, C.; PIO, C.A. *et al.* 2010. “Smoke Emissions from Biomass Burning in a Mediterranean Shrubland.” *Atmospheric Environment* 44 (25): 3024–33. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.05.010>

ALVES, C.; VICENTE, A.; NUNES, T. *et al.*; 2011. “Summer 2009 Wildfires in Portugal: Emission of Trace Gases and Aerosol Composition.” *Atmospheric Environment* 45 (3): 641–49. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.10.031>.

ANDREAE, M. O.; MERLET, P.; 2001. “Emission of Trace Gases and Aerosols from Biomass Burning.” *Global Biogeochemical Cycles* 15 (4): 955–66. <https://doi.org/10.1029/2000GB001382>.



BARDOS, C.; OLIVIER, P.; 2022. "The Radiative Transfer Model for the Greenhouse Effect." *SeMA Journal* 79 (3): 489–525. <https://doi.org/10.1007/s40324-021-00265-y>.

BOER, M. M.; ROHAN, J. S.; BRADSTOCK, R. A. *et al.*; 2008. "Spatial Scale Invariance of Southern Australian Forest Fires Mirrors the Scaling Behaviour of Fire-Driving Weather Events." *Landscape Ecology*. Springer Science and Business Media LLC. <https://doi.org/10.1007/s10980-008-9260-5>.

BOER, MM. M.; RESCO DE DIOS, V.; STEFANIAK, E. Z. *et al.*; 2021. "A Hydroclimatic Model for the Distribution of Fire on Earth." *Environmental Research Communications* 3, no. 3 (2021): 035001. <https://doi.org/10.1088/2515-7620/abec1f>

CHAVES-NAHARRO, J.; 2014. "Incendios forestales y cambio climático. Estimación de emisiones en los incendios de Andilla y Cortes de Pallás". *Riunet* . <http://hdl.handle.net/10251/51839>

CHUVIECO, E.; BRITTA, A; SALAS, J. eds.; 2003. *Wildland Fire Danger Estimation and Mapping*. University of Alcalá, Spain.

CROCKETT, J.; WESTERLING, A.; 2018. "Greater Temperature and Precipitation Extremes Intensify Western U.S. Droughts, Wildfire Severity, and Sierra Nevada Tree Mortality." *Journal of Climate* 31:341–54. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-17-0254.1>.

DE SANTIS, A.; ASNER, G. P.; VAUGHAN, P. J. *et al.*; 2010. "Mapping Burn Severity and Burning Efficiency in California Using Simulation Models and Landsat Imagery." *Remote Sensing of Environment* 114 (7): 1535–45. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2010.02.008>.

DELGADO-ARTÉS, R.; GARÓFANO-GÓMEZ, V.; OLIVER-VILLANUEVA, J. V. *et al.*; 2022. "Land Use/Cover Change Analysis in the Mediterranean Region: A Regional Case Study of Forest Evolution in Castelló (Spain) over 50 Years." *Land Use Policy* 114 (March): 105967. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2021.105967>.

DUANE, A.; CASTELLNOU, M.; BROTONS, L.; 2021. "Towards a comprehensive look at global drivers of novel extreme wildfire events". *Climatic Change* 165 (April): 43. <https://doi.org/10.1007/s10584-021-03066-4>

EFFIS; 2023. *Advance Report on Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2022*. Publications Office of the European Union, Luxembourg. <https://doi.org/10.2760/091540>.

EL GARROUSSI, S.; ADI GIUSEPPE, F.; BARNARD, C. *et al.*; 2024. "Europe faces up to tenfold increase in extreme fires in a warming climate" *npj Climate and Atmospheric Science* 7 (January), 30. <https://doi.org/10.1038/s41612-024-00575-8>

EVTYUGINA, M.; CALVO, A. I.; NUNES, T *et al.*; 2013. "VOC Emissions of Smouldering Combustion from Mediterranean Wildfires in Central Portugal." *Atmospheric Environment* 64 (January):339–48. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.001>.

FARRINGTON, D. P.; LOEBER, R.; 2000. "Some Benefits of Dichotomization in Psychiatric and Criminological Research." *Criminal Behaviour and Mental Health* 10, no. 2: 100–122. <https://doi.org/10.1002/cbm.349>.

FERNANDES, A. P.; LOPES, D.; SORTE, S. *et al.*; 2022. "Smoke Emissions from the Extreme Wildfire Events in Central Portugal in October 2017." *International Journal of Wildland Fire* 31 (11): 989–1001. <https://doi.org/10.1071/WF21097>.

GIORGI, F.; LIONELLO, P.; 2008. "Climate Change Projections for the Mediterranean



- Region.” *Global and Planetary Change* 63 (2–3): 90–104. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.09.005>.
- HOLDEN, Z. A.; SWANSON, A.; LUCE, C. H. *et al.*; 2018. “Decreasing Fire Season Precipitation Increased Recent Western US Forest Wildfire Activity.” *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115 (36). <https://doi.org/10.1073/pnas.1802316115>.
- IPCC; 2014. Fifth Assessment Report (AR5). *United Nations Climate Change*.
- KEELY, J. E.; SYPHARD, A. D.; 2021. “Large California Wildfires: 2020 Fires in Historical Context.” *Fire Ecology* 17 (1): 22. <https://doi.org/10.1186/s42408-021-00110-7>
- KEY, C. H.; BENSON, N.; 2006. “Landscape assessment (LA): Sampling and analysis methods” *USDA Forest Service Gen. Tech. Rep. RMRS-GTR-164-CD*
- LERMA-ARCE, V.; VAN DEN BERG, H.; OLIVER-VILLANUEVA, J. V. *et al.*; 2020. “Cartografía Territorial Del Stock de Carbono En La Comunitat Valenciana.” Accessed September 30, 2024. <https://politicaterritorial.gva.es/documents/20551069/174233262/Cartograf%C3%ADa+Territorial+del+Stock+de+Carbono+en+la+Comunitat+Valenciana.pdf/7e2501f8-2737-426e-80c5-617f33e98f36?t=1627301770832>.
- LIONELLO, P.; MALANOTTE-RIZZOLI, P.; BOSCOLO, R. *et al.*; 2006. “The Mediterranean Climate: An Overview of the Main Characteristics and Issues.” *Developments in Earth and Environmental Sciences* 4, 1-26. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80003-0](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80003-0)
- MADONDO, R.; MUTINGWENDE, N.; SHWABABA, S. *et al.*; 2022. “Analyses of trends in the fire losses and the fire-brigade call-outs in South Africa between 2004 and 2017”. *Geographia Technica* 17, Issue 2, 54-68. https://doi.org/10.21163/GT_2022.172.06
- MITECO; 2006. “Tercer Inventario Forestal Español”. Accessed September 30, 2024. <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.html>
- MITECO; 2021. “Los incendios Forestales en España. 1 enero – 31 diciembre 2020. Avance informativo” Accessed September 30, 2024. https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/biodiversidad/temas/incendios-forestales/avance_1_enero_31_diciembre_2020_tcm30-530816.pdf
- MITECO; 2024. “Informe de Inventario Nacional de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero. Edición 2024 (1990 – 2022)”. Accessed September 30, 2024. <https://www.miteco.gob.es/content/dam/miteco/es/calidad-y-evaluacion-ambiental/temas/sistema-espanol-de-inventario-sei-es-nir-edicion-2024.pdf>
- MOREIRA, F.; VIEDMA, O.; ARIANOUTSOU, M. *et al.*; 2011. “Landscape Wildfire Interactions in Southern Europe: Implications for Landscape Management.” *Journal of Environmental Management* 92 (October), Issue 10, 2389-2402. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2011.06.028>
- MOREIRA, F.; ASCOLI, D.; SAFFORD, H. *et al.*; 2020. “Wildfire Management in Mediterranean-Type Regions: Paradigm Change Needed.” *Environmental Research Letters* 15 (1): 011001. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab541e>.
- MUKHERJEE, S.; MISHRA, A.; TRENBERTH, K. E.; 2018. “Climate Change and Drought: A Perspective on Drought Indices.” *Current Climate Change Reports* 4, no. 2: 145-163. <https://doi.org/10.1007/s40641-018-0098-x>.



NOAA; 2023. "Wildfire Climate Connection". Accessed September 30, 2024. <https://www.noaa.gov/noaa-wildfire/wildfire-climate-connection>

PAUSAS, J. G.; VERDÚ, M.; 2005. "Plant Persistence Traits in Fire-Prone Ecosystems of the Mediterranean Basin: A Phylogenetic Approach." *Oikos* 109 (1): 196–202. <https://doi.org/10.1111/j.0030-1299.2005.13596.x>.

PAUSAS, J. G.; LLOVET, J.; RODRIGO, A. *et al.*; 2008. "Are Wildfires a Disaster in the Mediterranean Basin? - A Review." *International Journal of Wildland Fire* 17 (6): 713. <https://doi.org/10.1071/WF07151>.

RESCO DE DIOS, V.; CUNILL CAMPUBRÍ, À.; HE, Y. *et al.*; 2022. "North-south antiphase of wildfire activity across the pyroregions of continental China driven by NAO and the Antarctic oscillation". *The Science of the Total Environment* 859(3): 160386. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160386>

RODRIGUES, M.; CUNILL CAMPUBRÍ, À.; BALAGUER-ROMANO, R. *et al.*; 2023. "Drivers and Implications of the Extreme 2022 Wildfire Season in Southwest Europe." *Science of the Total Environment* 859, no. 1 (November 2022): 160320. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.160320>

SÁNCHEZ-LAULHÉ OLLERO, J.M.; MORA GARCÍA, M.A.; ROA ALONSO, A. *et al.*; 2020. "Informe Sobre El Estado Del Clima de España 2019." *Agencia Estatal de Meteorología*, Madrid.

SEYDI, S. T.; AKHOONDZADEH, M.; AMANI, M. *et al.*; 2021. "Wildfire Damage Assessment over Australia Using Sentinel-2 Imagery and MODIS Land Cover Product within the Google Earth Engine Cloud Platform." *Remote Sensing* 13 (2): 220. <https://doi.org/10.3390/rs13020220>.

SIOSE; 2015. "Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España. Descripción del modelo de datos SIOSE". Accessed September 30, 2024. https://www.siose.es/SIOSEtheme-theme/documentos/pdf/Descripcion_modelo_datos_SIOSE_v2.pdf

ÚBEDA, X.; SARRICOLEA, P.; 2016. "Wildfires in Chile: A Review." *Global and Planetary Change* 146 (November):152–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2016.10.004>

ULBRICH, U.; MAY, W.; LI, L. *et al.*; 2006 "Chapter 8 The Mediterranean Climate Change under Global Warming." *Developments in Earth and Environmental Sciences* 4, 399-415. [https://doi.org/10.1016/S1571-9197\(06\)80011-X](https://doi.org/10.1016/S1571-9197(06)80011-X)

URBANSKI, S.; 2014. "Wildland Fire Emissions, Carbon, and Climate: Emission Factors." *Forest Ecology and Management* 317 (April), 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.05.045>

WWF; 2020. "Fires, Forests and the Future: A Crisis Raging out of Control?" Accessed September 30, 2024. https://wwf.panda.org/wwf_news/?661151/fires2020report