

# ANÁLISIS DE DATOS LIDAR EN LA SIERRA DE LEYRE



Autores:  
Manuel Tejada Muñoz  
Bernardo Fontana Campos

Diciembre 2025

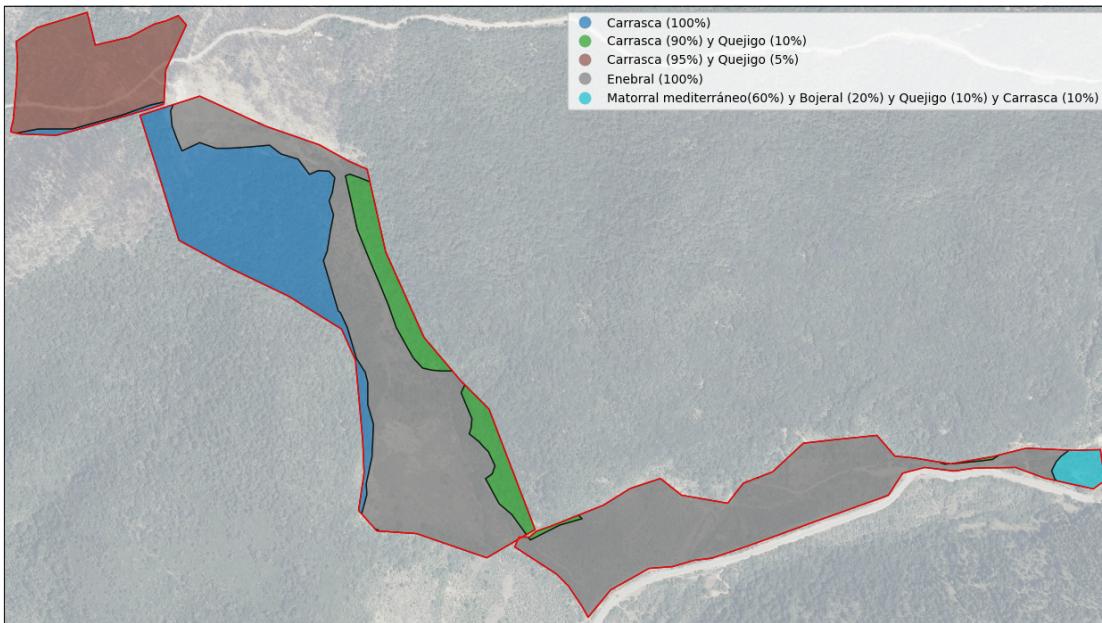
## **Índice**

<b>1. SITUACIÓN</b>	<b>2</b>
<b>2. FUENTE DE DATOS Y METODOLOGÍA</b>	<b>3</b>
<b>3. RESULTADOS</b>	<b>6</b>
3.1. Método de Rothermel . . . . .	6
3.1.1. Zona 1 . . . . .	6
3.1.2. Zona 2 . . . . .	15
3.1.3. Zona 3 . . . . .	24
3.2. Fórmula alométrica . . . . .	31
3.2.1. Zona 1 . . . . .	31
3.2.2. Zona 2 . . . . .	33
3.2.3. Zona 3 . . . . .	35
3.3. Perfil de nube de puntos . . . . .	37
3.3.1. Zona 1 . . . . .	37
3.3.2. Zona 2 . . . . .	39
3.3.3. Zona 3 . . . . .	41
<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>43</b>

---

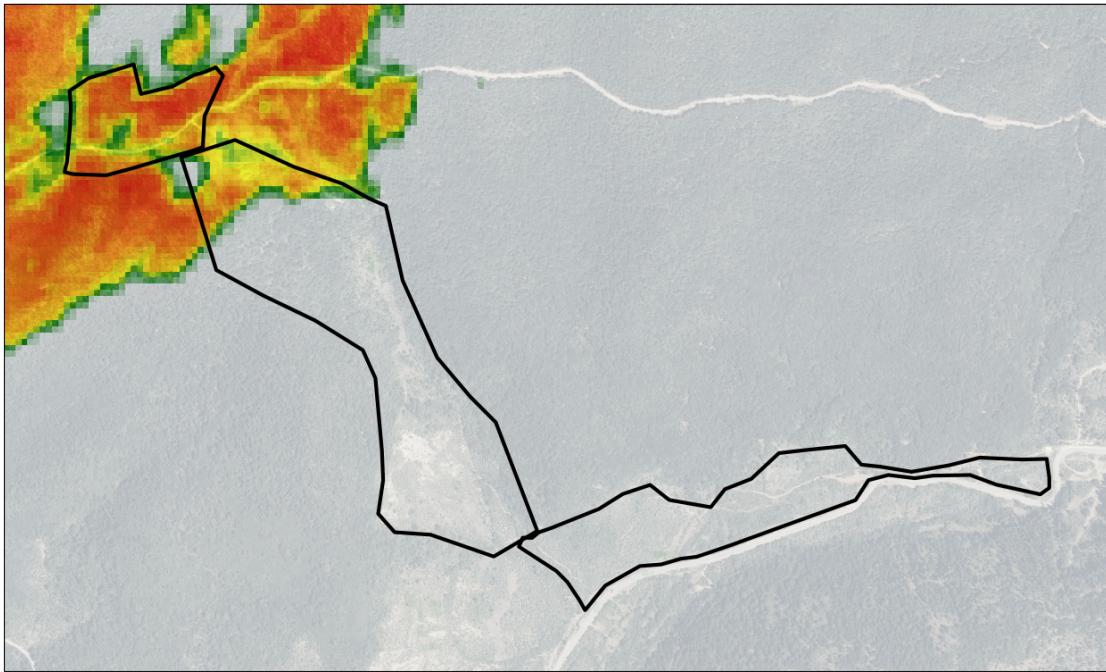
## 1. SITUACIÓN

Las parcelas de estudio se encuentran localizadas en la cara sur de la sierra de Leyre dentro del municipio de Yesa. Se muestra un mapa con la distribución de la vegetación:



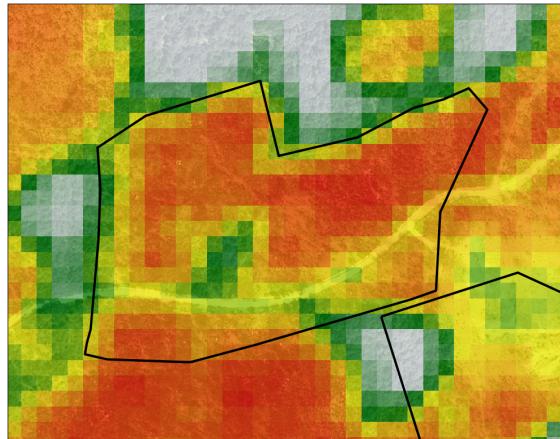
**Figura 1:** Mapa de vegetación en las parcelas de estudio. Fuente: elaboración propia a partir de datos obtenidos del IDENA

En el año 2022 parte de la zona de estudio se vio afectada por un incendio forestal ocurrido el 15 de junio de ese año. Se muestra un mapa de las zonas afectadas por el incendio. La escala de colores representa el grado de severidad del incendio usando la metodología citada en [1] y usando datos del satélite Sentinel 2 de la Agencia Espacial Europea [2]



**Figura 2:** Zonas afectadas por el incendio forestal del 2022. Fuente: elaboración propia a partir de imágenes multiespectrales del satélite Sentinel2

Se puede observar que el incendio afectó principalmente a la zona 2, pero la severidad del mismo no fue homogénea en todo su territorio. Se muestra detalle de la severidad en esa zona y como se observa una “isla” de color verde en el que el incendio tuvo menos intensidad.



**Figura 3:** Detalle de la severidad del incendio en la zona 2. Fuente: elaboración propia a partir de imágenes multiespectrales del satélite Sentinel2

## 2. FUENTE DE DATOS Y METODOLOGÍA

Para describir la evolución de la vegetación de los últimos años y observar la afectación de la carga ganadera, los desbroces y el incendio de 2022 se cuentan con 4 fuentes de datos LIDAR:

- 
- Vuelo del Plan Nacional de Ortofotografía Aerea (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional realizado en el año 2017 con una resolución de 17 puntos / m<sup>2</sup>. A partir de ahora estos datos se nombrarán como IGN2017 [3]
  - Vuelo del Plan Nacional de Ortofotografía Aerea (PNOA) del Instituto Geográfico Nacional realizado en el año 2024 con una resolución de 5 puntos / m<sup>2</sup>. A partir de ahora estos datos se nombrarán como IGN2024 [3]
  - Vuelo de agosto de 2024 con una resolución aproximada de 200 puntos / m<sup>2</sup>. A partir de ahora estos datos se nombrarán como Vuelo1
  - Vuelo de octubre de 2024 con una resolución aproimada de 200 puntos / m<sup>2</sup>. A partir de ahora estos datos se nombrarán como Vuelo2

Se han utilizado dos métodos para calcular biomasa a partir de datos LIDAR:

- Método basado en los modelos de combustible de Rothermel.
- Fórmula alométrica.

### **Método de cálculo de biomasa basado en modelos de combustible de Rothermel**

Para el cálculo de la biomasa se recurre a los modelos de combustible de Rothermel [4].

Rothermel estableció una serie de modelos de combustible para caracterizar el comportamiento del fuego en un incendio forestal. En total son 13 modelos los cuales están divididos en:

- Modelos de pasto (1, 2 y 3)
- Modelos de matorral (4, 5, 6 y 7)
- Modelos de hojarasca bajo arbolado (8 y 9)
- Modelos de restos de poda y otras actividades selvícolas (10, 11, 12 y 13).

A cada uno de los modelos Rothermel le asignó un intervalo de carga de combustible, por ejemplo, al modelo 1 le asigna una carga de combustible de entre 1 y 2 T/ha y al modelo 4 entre 25 y 35 T/ha. Es importante señalar que para el cálculo de este intervalo considera solo la parte de biomasa que va a propagar el fuego. Por ejemplo en el modelo 7, que es un modelo de matorral bajo arbolado solo considera la carga de biomasa del matorral, pues considera que va a ser el agente propagador del fuego. A la hora de hacer nuestros cálculos esto tiene un aspecto negativo y otro positivo; el negativo es que la carga de biomasa estará subestimada para el modelo 7 (puesto que no considera la biomasa que aporta el arbolado), el positivo es que nos dará un cálculo de la biomasa más centrado en la prevención de incendios forestales.

Se muestra a continuación la tabla de modelos de combustible de Rothermel y el intervalo de carga de combustible de cada uno de ellos.

Grupo	Modelo	Descripción	Carga de biomasa
Pastos	1	Pastizal continuo fino, seco y bajo, con altura por debajo de la rodilla. El matorral o el arbolado cubren menos de un tercio de la superficie.	1-2 T/ha
	2	Pastizal con presencia de matorral o arbolado claro que cubren más de un tercio de la superficie sin llegar a dos tercios.	5-10 T/ha
	3	Pastizal o cultivo herbáceo de más de un metro de altura.	4-6 T/ha
Matorral	4	Matorral o arbolado joven muy denso de unos dos metros de altura. Continuidad horizontal y vertical del combustible.	25-35 T/ha
	5	Matorral denso pero bajo, altura no superior a 0,6 metros. Con cargas ligeras de hojarasca del mismo matorral, que contribuye a propagar el fuego con vientos flojos	5-8 T/ha
	6	Matorral más viejo que en el modelo 5, con alturas entre 0,6 y 1,2 metros. Los combustibles vivos son más escasos y dispersos.	10-15 T/ha
Hojarasca	7	Matorral inflamable, de 0,6 a 2 metros de altura, que propaga el fuego bajo el arbolado.	10-12 T/ha
	8	Hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas.	7-9 T/ha
	9	Hojarasca en bosque denso de coníferas o frondosas, que se diferencia del modelo 8 en que forma una capa esponjada poco compacta, con mucho aire interpuesto	7-9 T/ha

Para poder aplicar este método de cálculo de biomasa se debe contar con un mapa de modelos de combustible, para ello se usará el método descrito en [5]. Se usarán los datos LiDAR descritos anteriormente y se obtendrán 4 mapas de combustible para los 4 momentos en los que se realizaron los vuelos LiDAR. La resolución de estos mapas será de 10 m/pixel. Se calculará la superficie que ocupa cada modelo de combustible y se multiplicará esa superficie por el valor intermedio de intervalo que asigna Rothermel a cada modelo, por ejemplo, para el modelo 1 (1-2 T/ha) se multiplicará por 1.5. Posteriormente se hará el sumatorio de las cargas de cada uno de los modelos de combustible para obtener la carga de biomasa total de la zona.

### Estimación de biomasa usando ecuaciones alométricas

Las ecuaciones alométricas permiten hacer estimaciones de valores difíciles de medir como es la biomasa de un arbol a partir de valores más fáciles de medir como el diámetro y la altura del mismo. En el caso que nos ocupa se va a estimar la biomasa de las zonas de estudio a partir de los datos LiDAR que se disponen. Para realizar esta estimación se va a usar la siguiente ecuación citada en [6]:

$$AGB_{LIDAR} = 0.36 * \mu_z^{1.16} * z_{75}^{0.78} * z_{10}^{-0.18} * k_z^{0.41}$$

Siendo:

- mu: la altura media sobre el terreno de todos los retornos LiDAR
- z\_75: El percentil 75 de los retornos
- z-25: El percentil 25 de los retornos
- k: kurtosis de la distribución de retornos.

Para calcular la biomasa de las zonas de estudio se va a dividir dichas zonas en cuadriculas de 10x10 metros a las que se va a aplicar la ecuación. Esta ecuación dará la biomasa para esa cuadrícula medida en kg/m<sup>2</sup>, como las cuadrículas tienen una superficie de 100 m<sup>2</sup> se tiene que multiplicar por 100 para obtener la biomasa total de la cuadrícula. Se hará el sumatorio de todas las cuadrículas que conforman la zona de estudio para obtener la biomasa total de la zona. Este procedimiento se realizará para cada una de las trez zonas y cada uno de los vuelos de que se dispone.

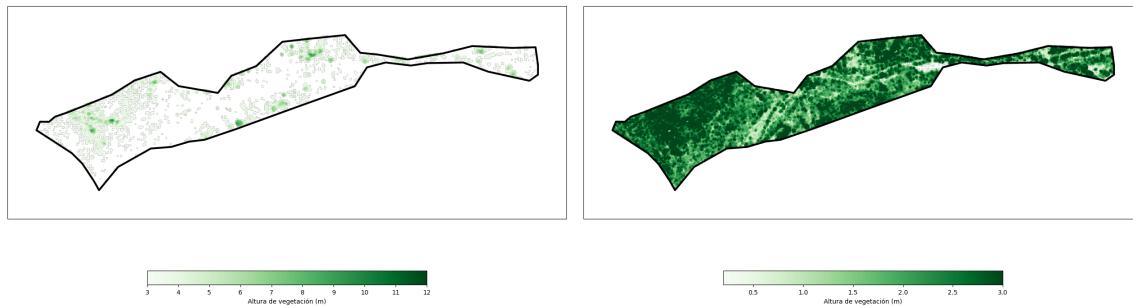
## 3. RESULTADOS

### 3.1. Método de Rothermel.

Para poder obtener los mapas de combustible se deben obtener los mapas de matorral y arbolado tal y como se describe en [5]. El mapa de matorral se obtendrá usando los datos LiDAR y se asignará a cada pixel el valor máximo de todos los retornos de ese pixel clasificados como vegetación y cuya altura respecto al suelo esté entre 0.2 y 3 metros (se omiten los valores de 0 a 0.2 para no incluir retornos que puedan ser ruido). Para el mapa de arbolado se usará el valor máximo de los puntos clasificados como vegetación cuya altura respecto al suelo sea de más de 3 metros. Tanto el mapa de arbolado como de matorral tienen una resolución de 1 m/pixel.

#### 3.1.1. Zona 1

IGN2017

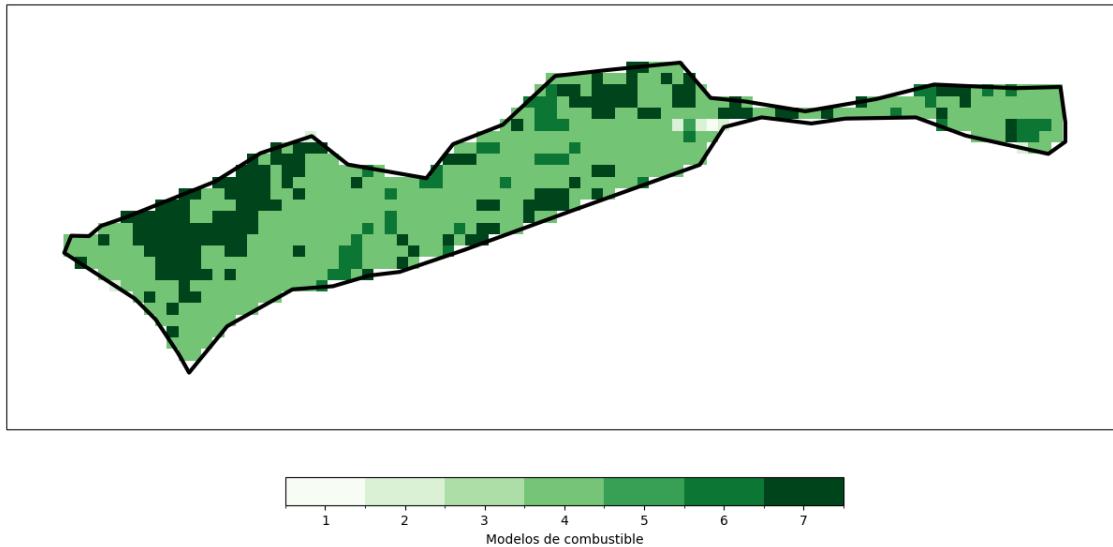


**Figura 4:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2017.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

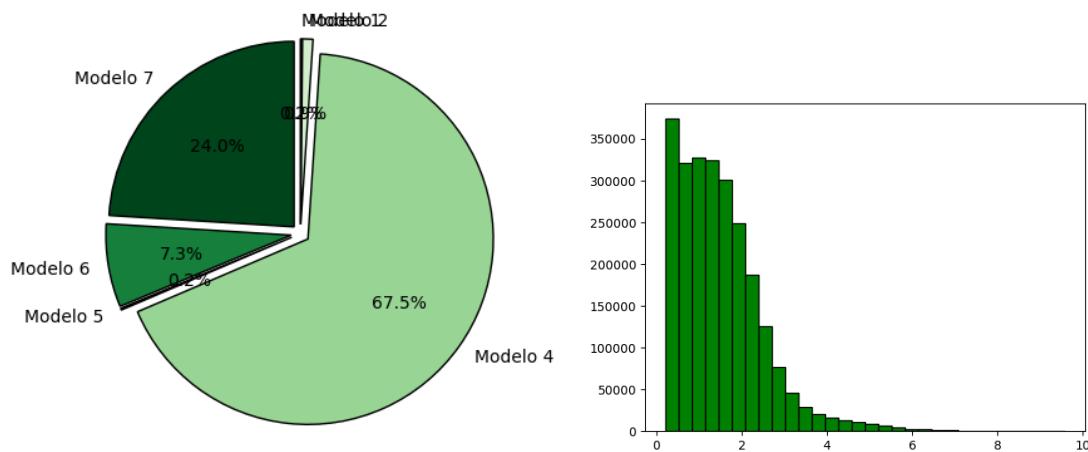
### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 5:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2017.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:



**Figura 6:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

Se observa predominio de modelo 4, es decir, un matorral alto y denso con gran capacidad de propagar incendios forestales y al que Rothermel le asigna un valor alto de biomasa por unidad de superficie

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas

### 3.1 Método de Rothermel.

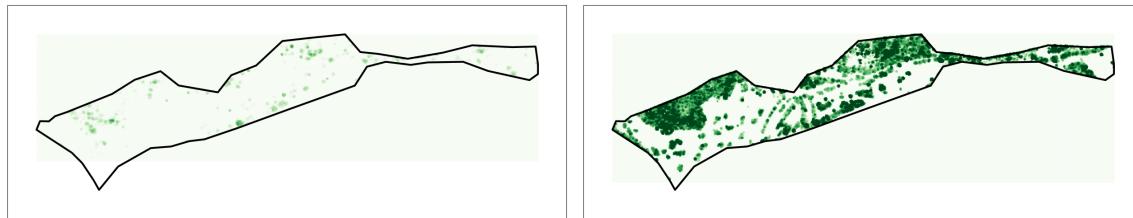
y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el área por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

modelo	area	carga
1	0.01	0.01
2	0.06	0.45
4	4.47	134.10
5	0.01	0.07
6	0.48	6.00
7	1.59	19.88
Total	6.62	160.51

**Figura 7:** Carga de cada modelo de combustible

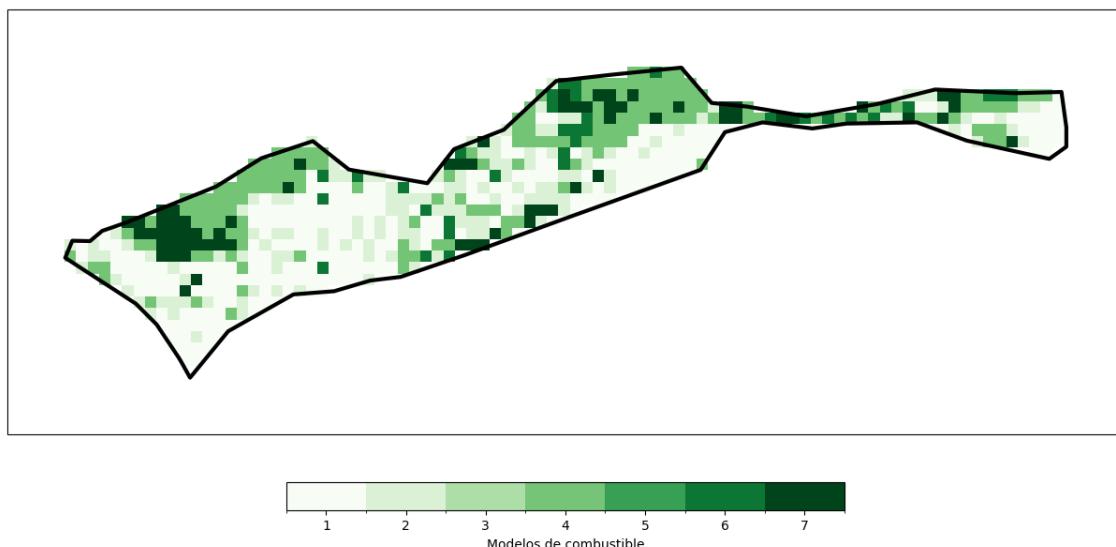
La carga estimada total es de 160.51 Toneladas

#### Vuelo1



**Figura 8:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo1.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

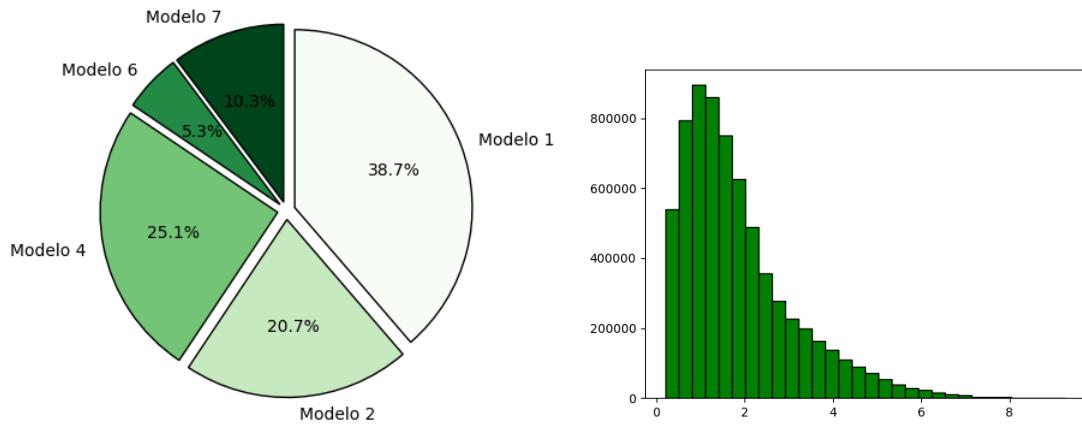


**Figura 9:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo1.

### 3.1 Método de Rothermel.

---

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:



**Figura 10:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

Se observa una disminución en el modelo 4 y una aumento de los modelos de pasto 1 y 2, este cambio en la carga de combustible es probable que se deba a los desbroces ejecutados en la zona

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el área por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

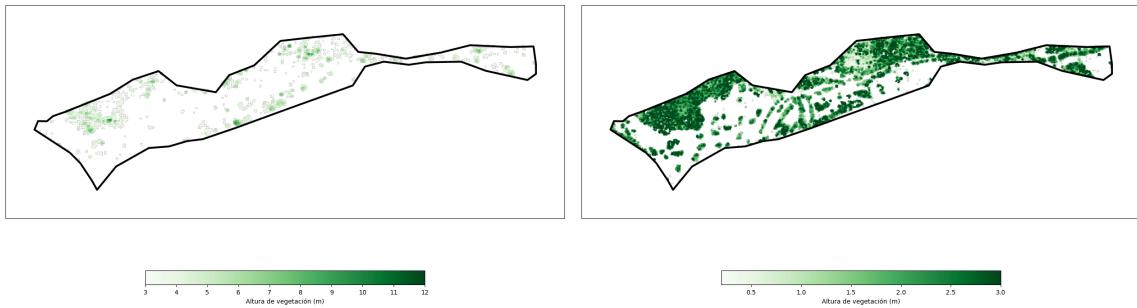
modelo	area	carga
1	2.56	3.84
2	1.37	10.28
4	1.66	49.80
6	0.35	4.38
7	0.68	8.50
Total	6.62	76.79

**Figura 11:** Carga de cada modelo de combustible

La carga estimada total es de 76.79 Toneladas

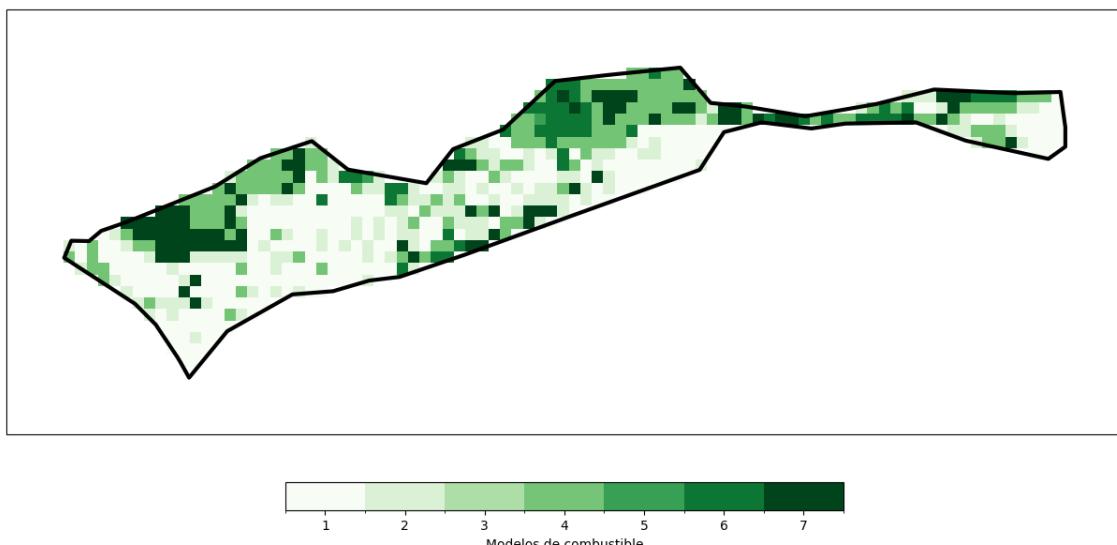
### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 12:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2024.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

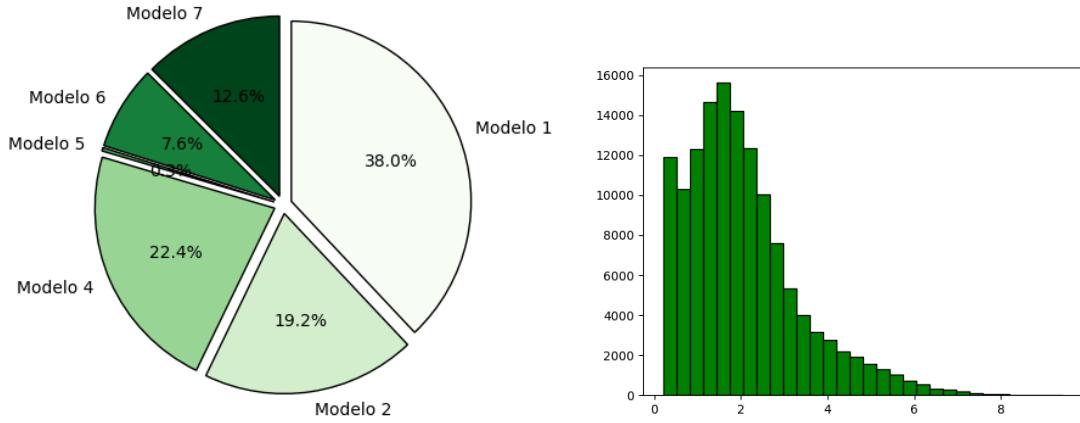


**Figura 13:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2024.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:

### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 14:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

Similar a los datos del vuelo IGN2024, pero en el histograma se observa un repunte de retornos en capas bajas de vegetación.

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el área por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

modelo	area	carga
1	2.51	3.76
2	1.27	9.53
4	1.48	44.40
5	0.02	0.14
6	0.50	6.25
7	0.83	10.38
9	0.01	0.08
Total	6.62	74.53

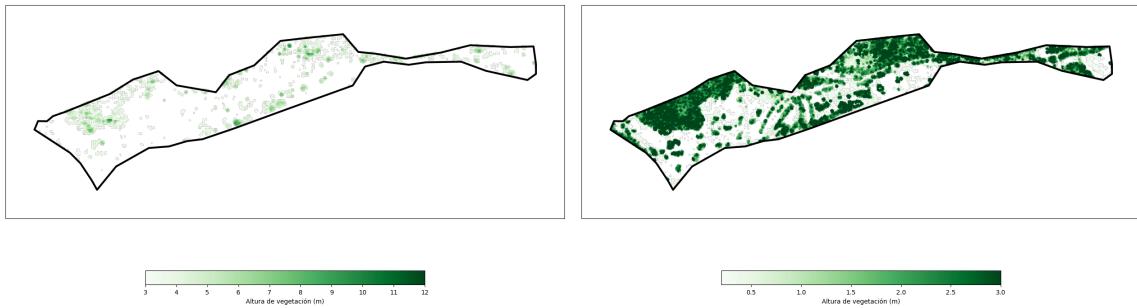
**Figura 15:** Carga de cada modelo de combustible

La carga estimada total es de 74.53 Toneladas

**Vuelo2**

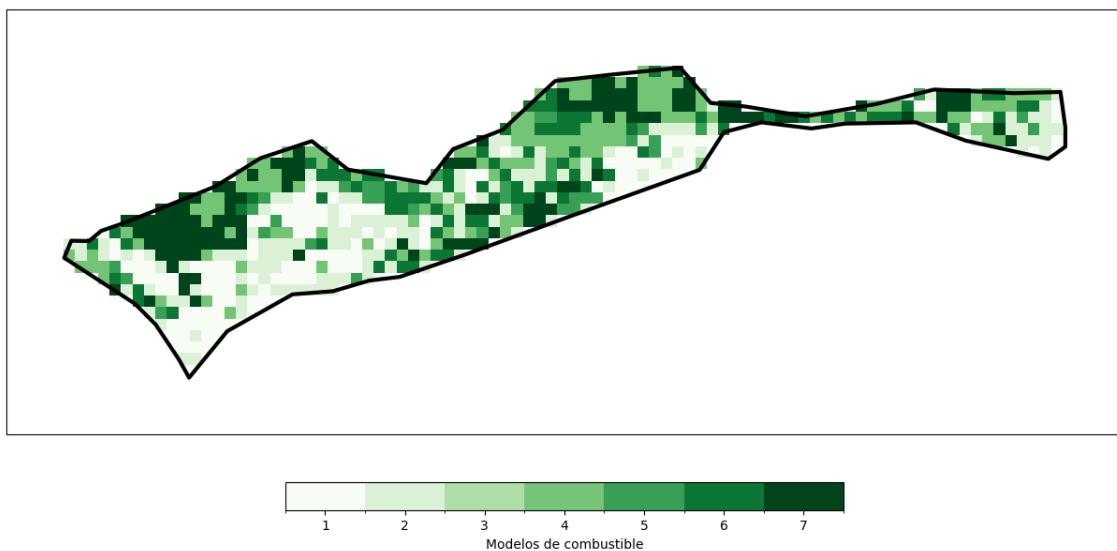
### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 16:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo2.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

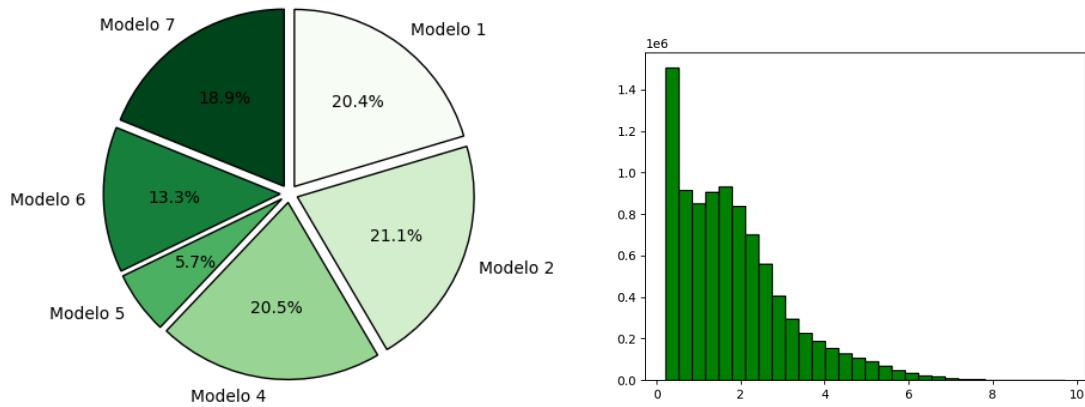


**Figura 17:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo2.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:

### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 18:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

Se observa un ligero aumento en el porcentaje de modelos de matorral (5 y 6) y una disminución de los modelos de pasto

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el area por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

modelo	area	carga
1	1.35	2.03
2	1.40	10.50
4	1.36	40.80
5	0.38	2.66
6	0.88	11.00
7	1.25	15.62
Total	6.62	82.61

**Figura 19:** Carga de cada modelo de combustible

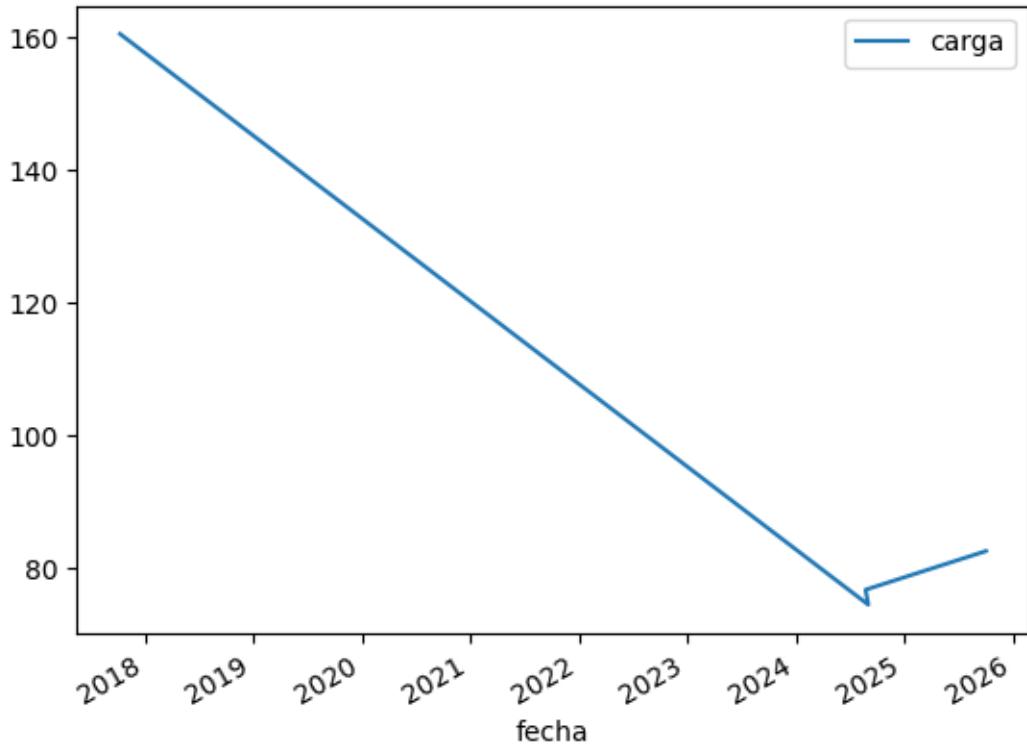
La carga estimada total es de 82.61 Toneladas

#### Análisis de los datos obtenidos para la zona1

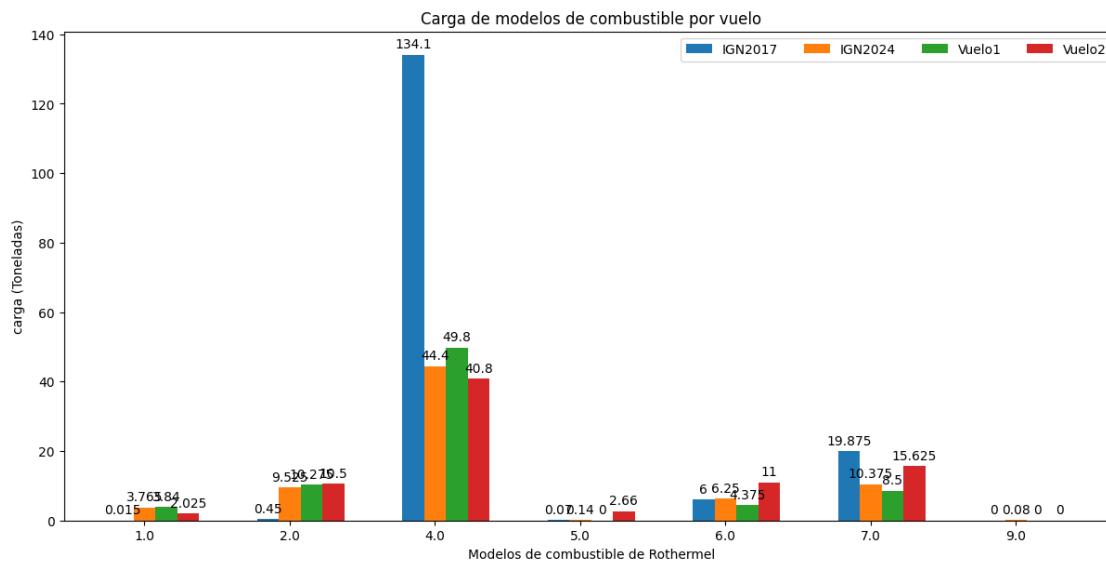
Para analizar la evolución en el tiempo de la biomasa se muestra la siguiente gráfica.

### 3.1 Método de Rothermel.

---



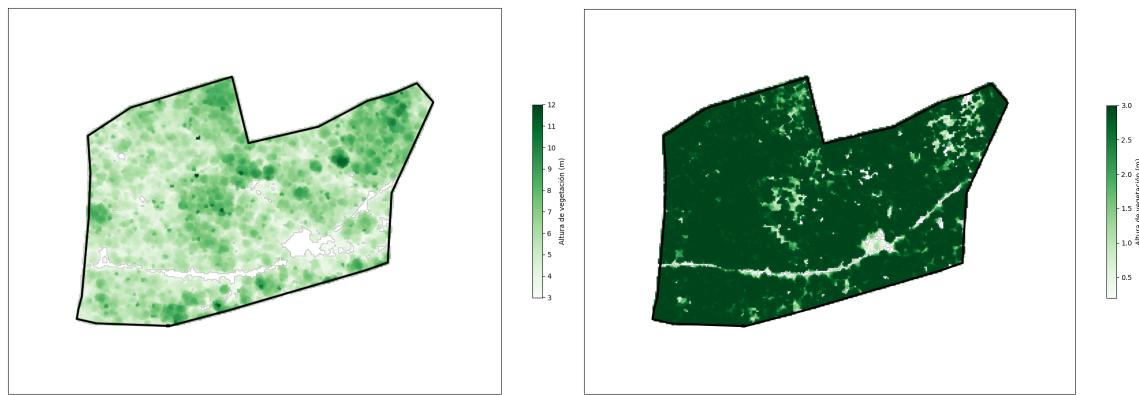
Como se puede observar en la gráfica, se muestra una descenso notable de biomasa entre 2017 y 2024, esto es debido a los desbroces realizados, que transformaron zonas de modelo 4 en zonas de modelo de pasto (modelos 1 y 2). En la siguiente tabla se muestra el decrecimiento de biomasa del modelo 4.



### 3.1 Método de Rothermel.

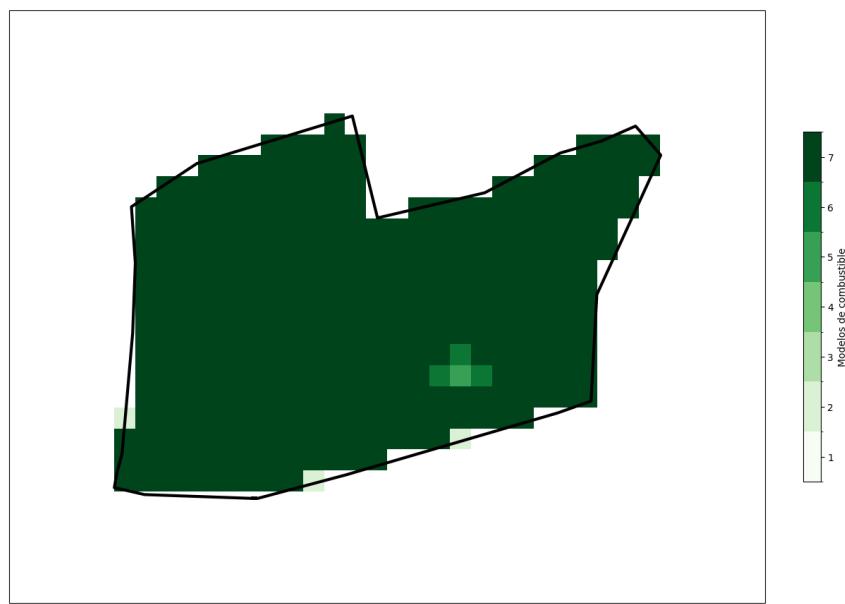
#### **3.1.2. Zona 2**

**IGN2017**



**Figura 20:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2017.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

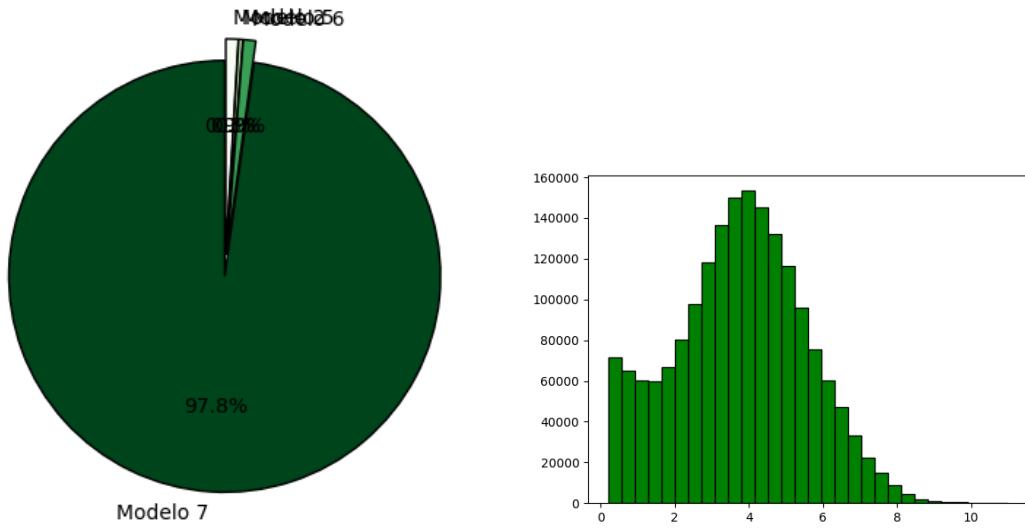


**Figura 21:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2017.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:

### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 22:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

Predominio casi total de modelo 7. Es decir un modelo de matorral bajo arbolado con continuidad vertical. Rothermel le asigna cargas de biomasa por unidad de superficie medias pues considera que es el matorral, principalmente, el que va a propagar el fuego

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el area por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

modelo	area	carga
2	0.03	0.22
5	0.01	0.07
6	0.03	0.38
7	3.16	39.50
Total	3.23	40.17

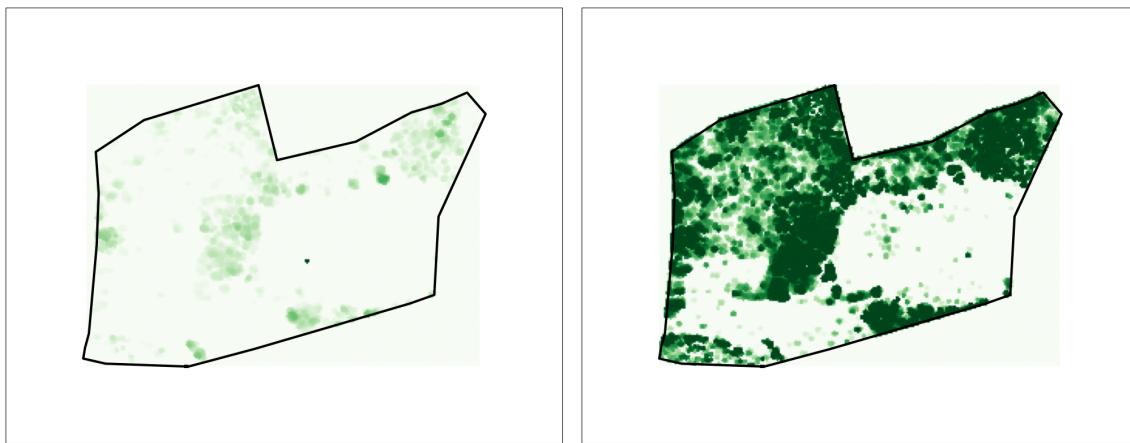
**Figura 23:** Carga de cada modelo de combustible

La carga estimada total es de 40.17 Toneladas

**Vuelo1**

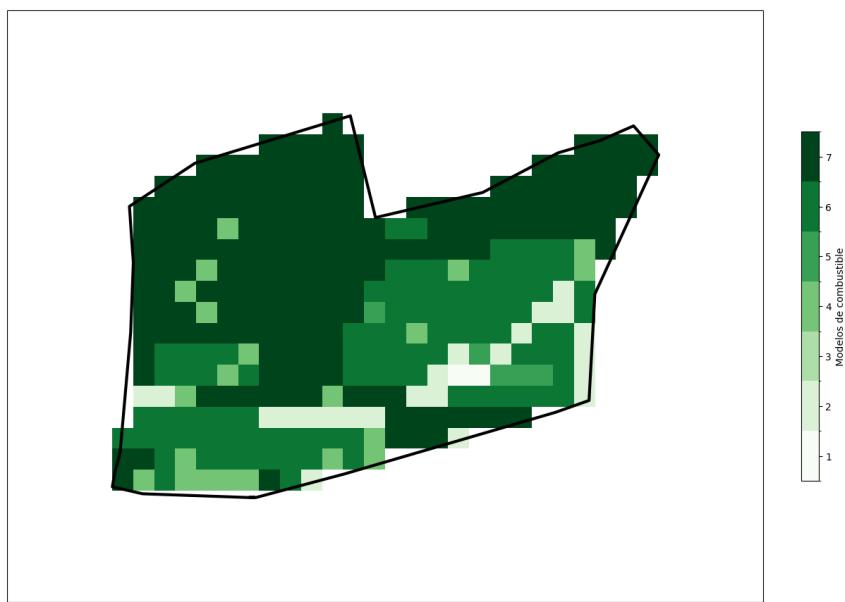
### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 24:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo1.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

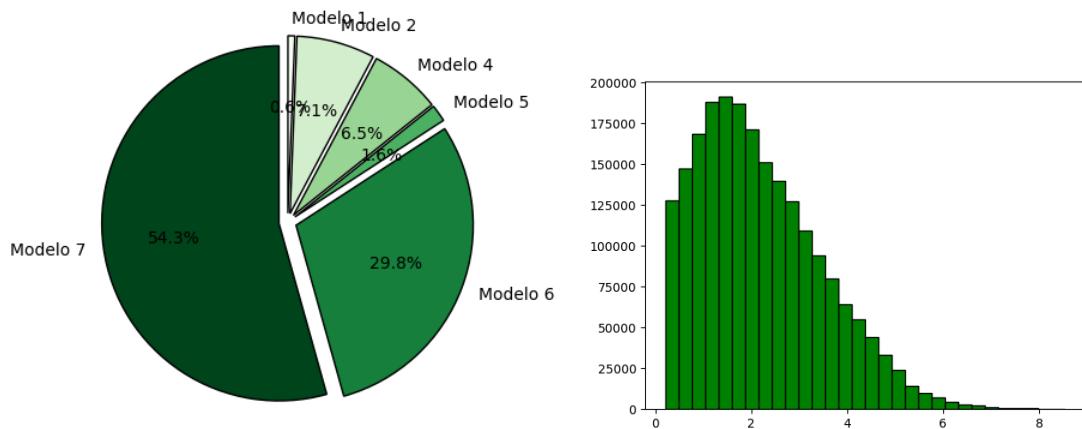


**Figura 25:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo1.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:

### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 26:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

Debido al incendio de 2022 se observa una disminución drástica en la vegetación lo que se traduce en disminución de modelo 7 y aumento de los modelos de combustible de tipo matorral

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el área por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

modelo	area	carga
1	0.02	0.03
2	0.23	1.72
4	0.21	6.30
5	0.05	0.35
6	0.96	12.00
7	1.75	21.88
Total	3.22	42.28

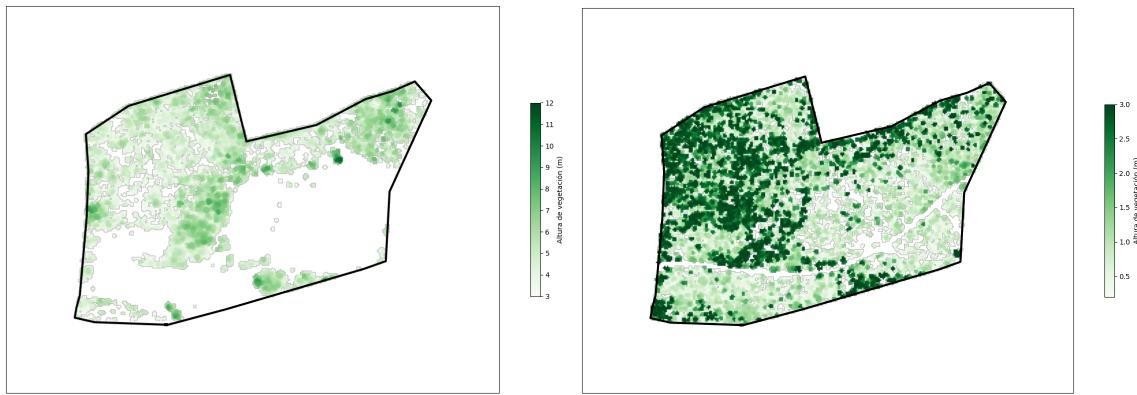
**Figura 27:** Carga de cada modelo de combustible

La carga estimada total es de 42.28 Toneladas

**IGN2024**

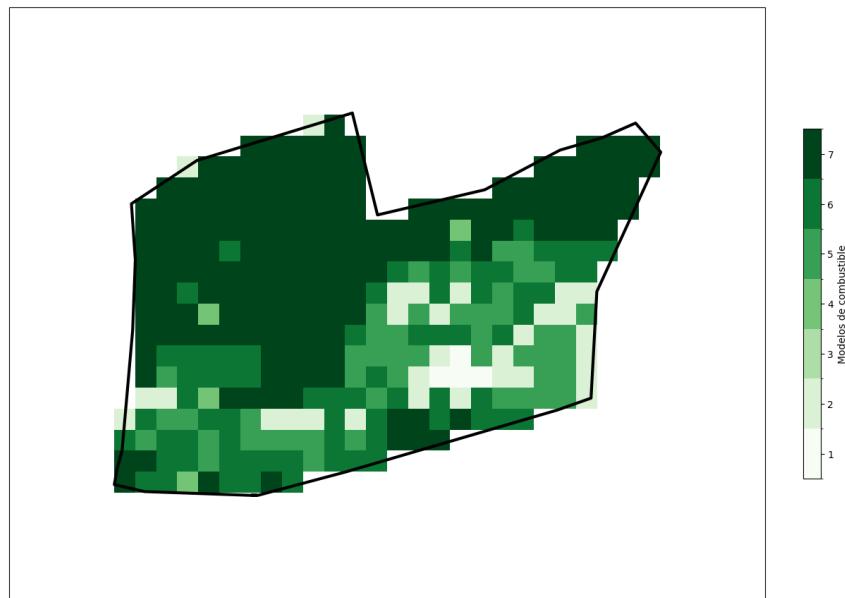
### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 28:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2024.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

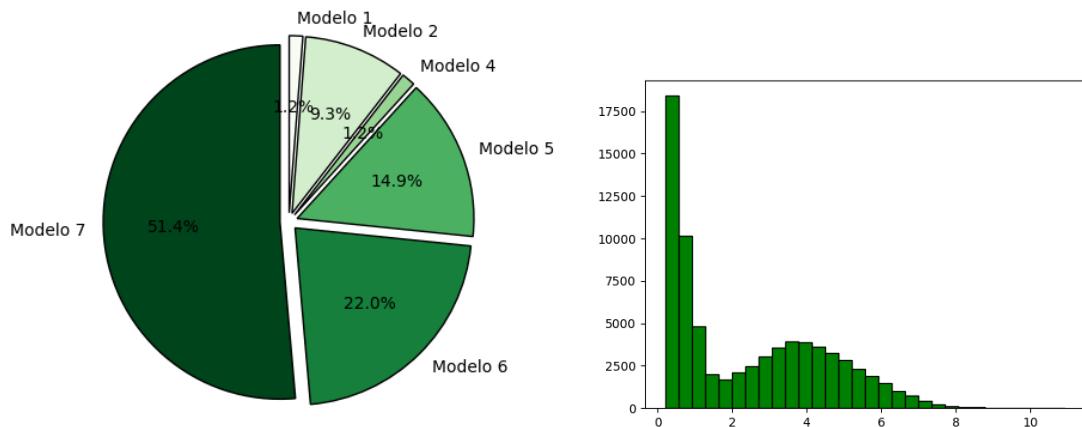


**Figura 29:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2024.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:

### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 30:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

Similar a los datos de IGN2024, también se observa en el histograma un aumento de retornos en capas bajas de vegetación

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el área por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

modelo	area	carga
1	0.04	0.06
2	0.30	2.25
4	0.04	1.20
5	0.48	3.36
6	0.71	8.88
7	1.66	20.75
9	0.01	0.08
Total	3.24	36.57

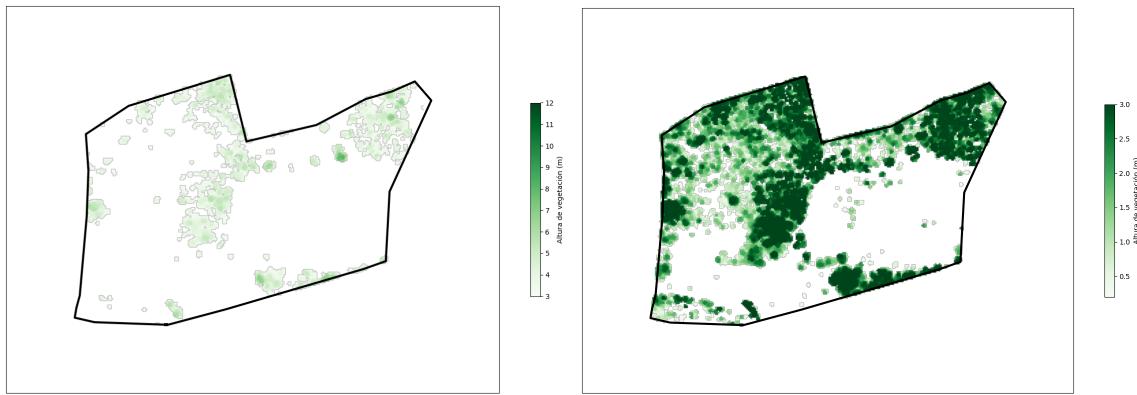
**Figura 31:** Carga de cada modelo de combustible

La carga estimada total es de 36.57 Toneladas

**Vuelo2**

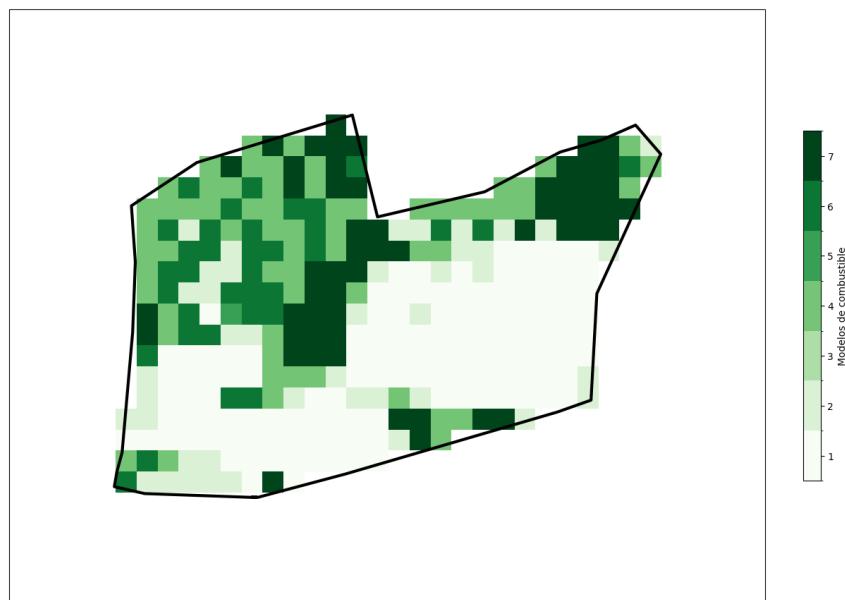
### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 32:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo2.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

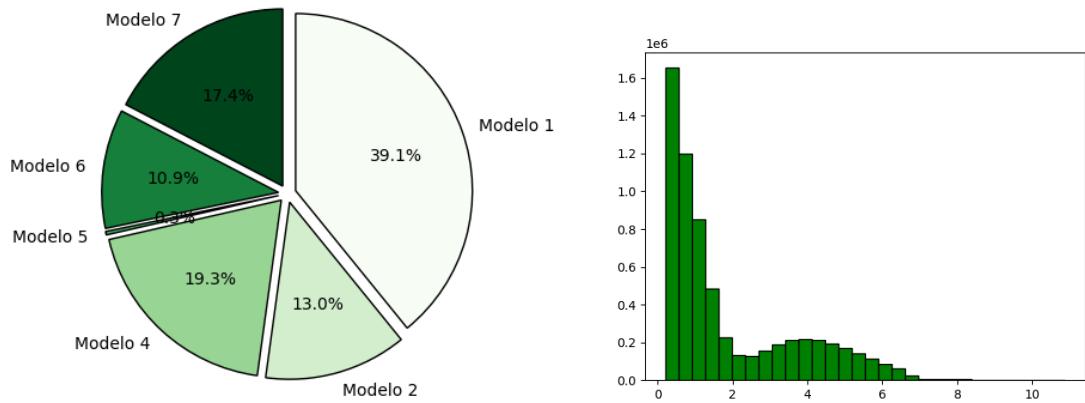


**Figura 33:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo2.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:

### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 34:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

El incremento de retornos en capas bajas de vegetación en el histograma es más evidente que en el año anterior, pudiendo indicar que la carga ganadera es demasiado baja

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el área por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

modelo	area	carga
1	1.26	1.89
2	0.42	3.15
4	0.62	18.60
5	0.01	0.07
6	0.35	4.38
7	0.56	7.00
Total	3.22	35.09

**Figura 35:** Carga de cada modelo de combustible

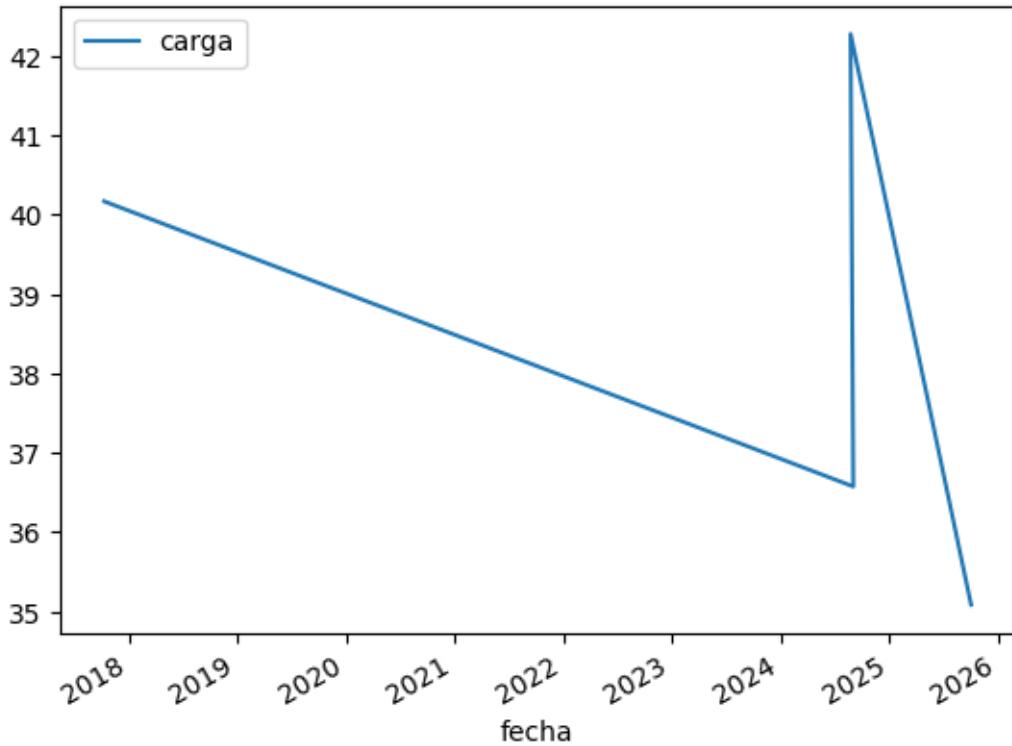
La carga estimada total es de 35.09 Toneladas

#### Análisis de los datos obtenidos para la zona2

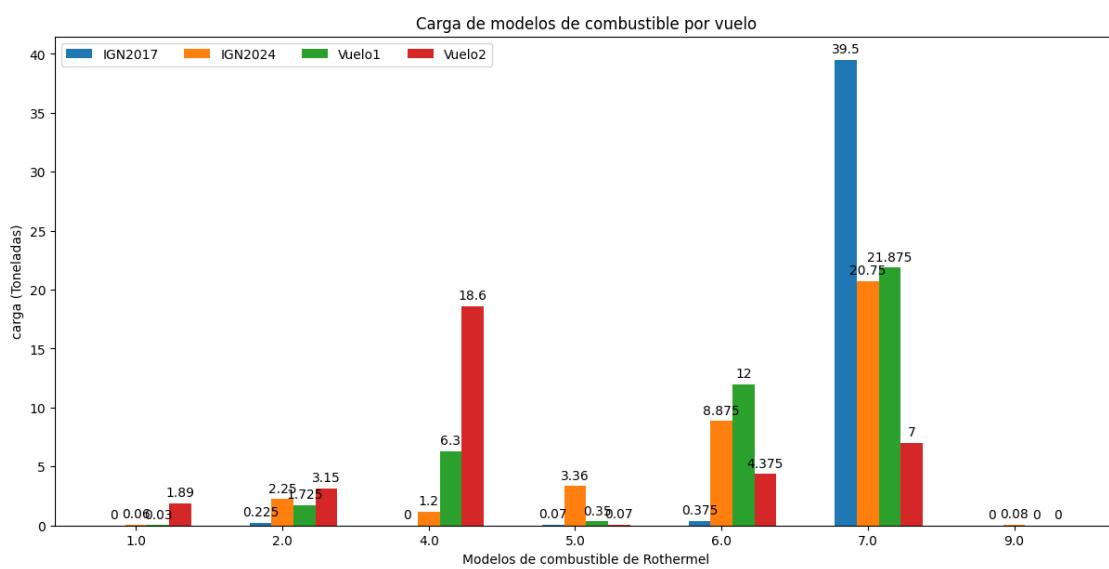
Para analizar la evolución en el tiempo de la biomasa se muestra la siguiente gráfica.

### 3.1 Método de Rothermel.

---



Se observa que hay descenso de biomasa, pero este descenso no es muy acusado (alrededor de un 10 %) a pesar de que la zona fue afectada por un incendio forestal en el año 2022. Como se comentó en el apartado anterior, una de las desventajas de usar este método de cálculo de la biomasa es que se subestima la biomasa del modelo 7. En la siguiente gráfica se muestra la evolución de este modelo (y del resto) en los diferentes vuelos LiDAR.



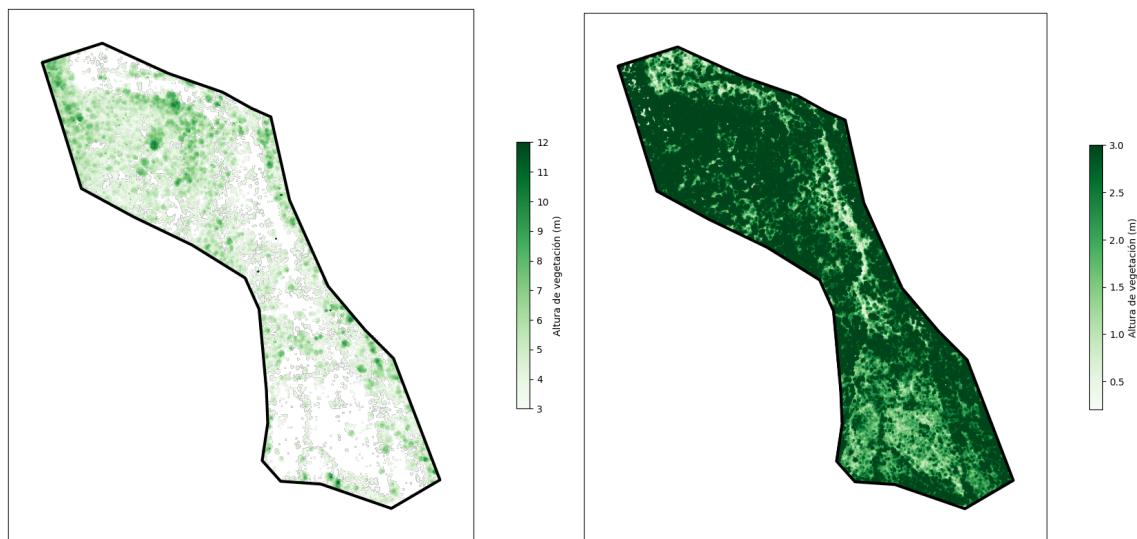
### 3.1 Método de Rothermel.

---

Como se observa, el modelo 7 sufrió un descenso considerable del 2017 al 2024, posiblemente debido al incendio forestal del 2022. Posteriormente a ese incendio se realizó un resalveo que puso en luz la vegetación de matorral y por consiguiente se produjo un aumento de los modelos de combustible de este tipo. Como se dijo en el apartado anterior, uno de los beneficios de este método es observar la evolución de la vegetación desde una perspectiva de prevención de incendios forestales, en este caso, se observa como la puesta en luz de la vegetación después de un resalveo puede beneficiar a la vegetación con más potencial de arder y propagar incendios forestales (modelo 4).

#### 3.1.3. Zona 3

IGN2017

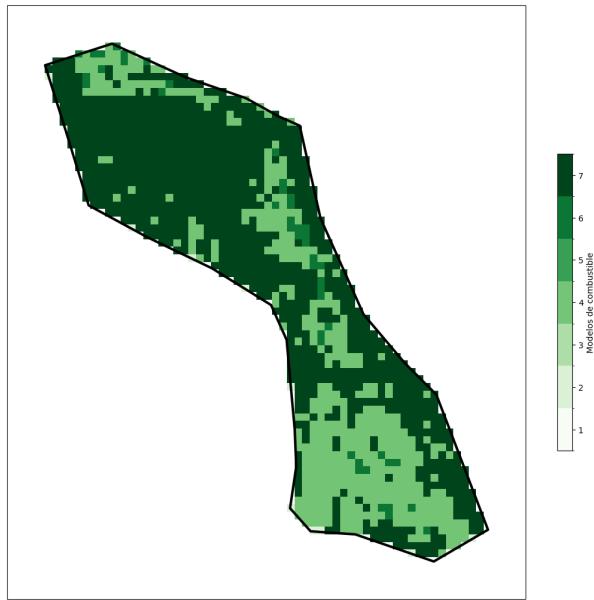


**Figura 36:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2017.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

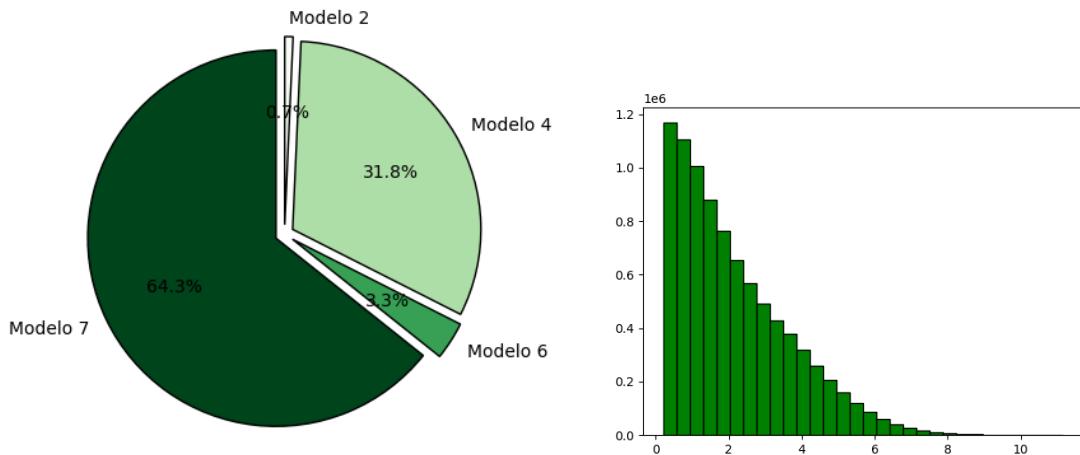
### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 37:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2017.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:



**Figura 38:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

Zona muy inflamable con presencia alta de 2 de los modelos más desfavorables para la propagación de un incendio forestal, el modelo 4 y el modelo 7

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas

### 3.1 Método de Rothermel.

---

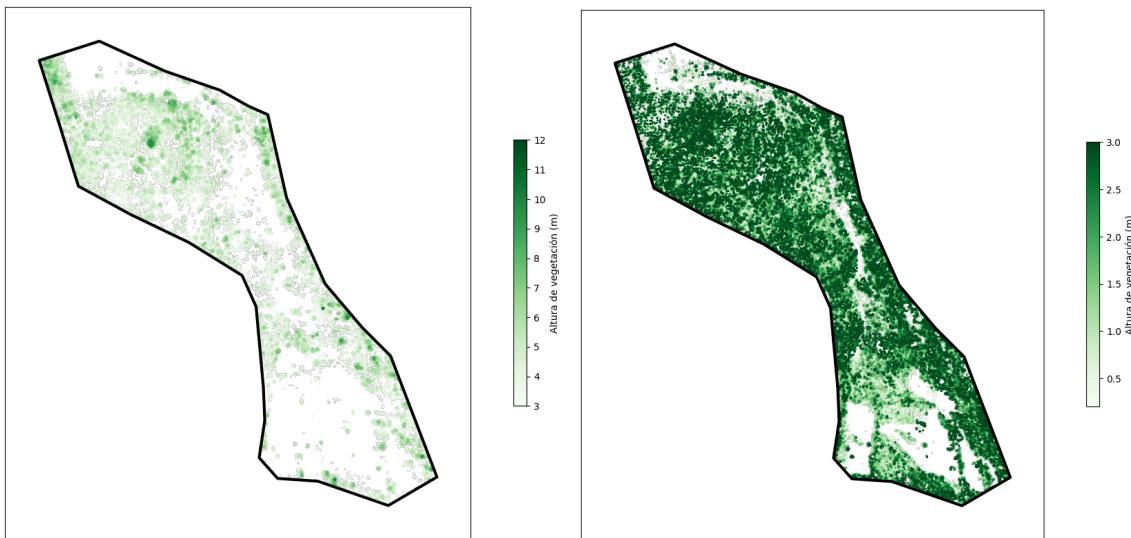
y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el área por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

modelo	area	carga
2	0.10	0.75
4	4.49	134.70
6	0.46	5.75
7	9.09	113.62
Total	14.14	254.83

**Figura 39:** Carga de cada modelo de combustible

La carga estimada total es de 254.83 Toneladas

**IGN2024**

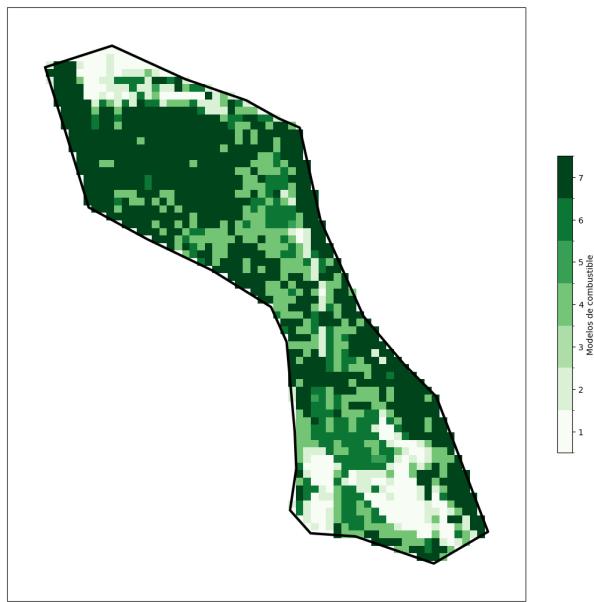


**Figura 40:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2024.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

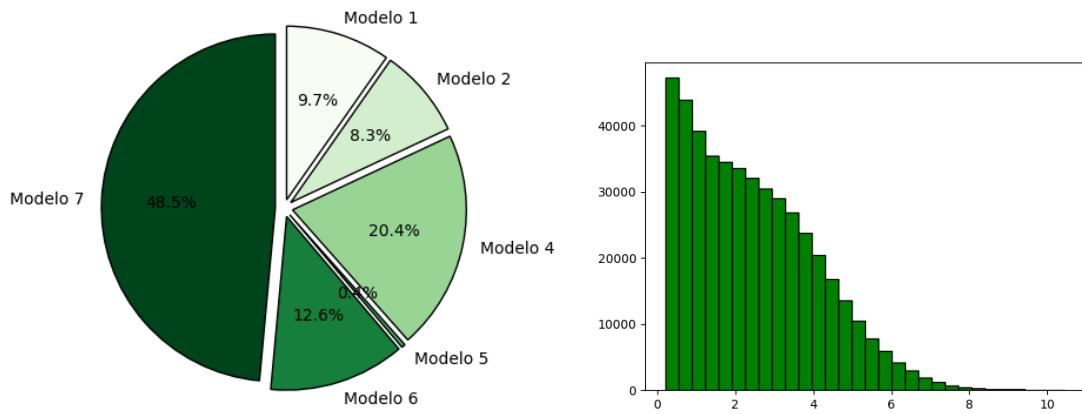
### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 41:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de IGN2024.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:



**Figura 42:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

En los mapas de vegetación se muestra una disminución de la misma en dos zonas muy concretas de la parcela: zona sur debido a desbroces realizados en 2024 y zona norte debido al incendio forestal de 2022. Eso se traduce en el aumento de modelos de combustible menos favorables para la propagación de un incendio forestal, como los modelos de pasto 1 y 2 y el modelo de matorral de tipo 6

### 3.1 Método de Rothermel.

---

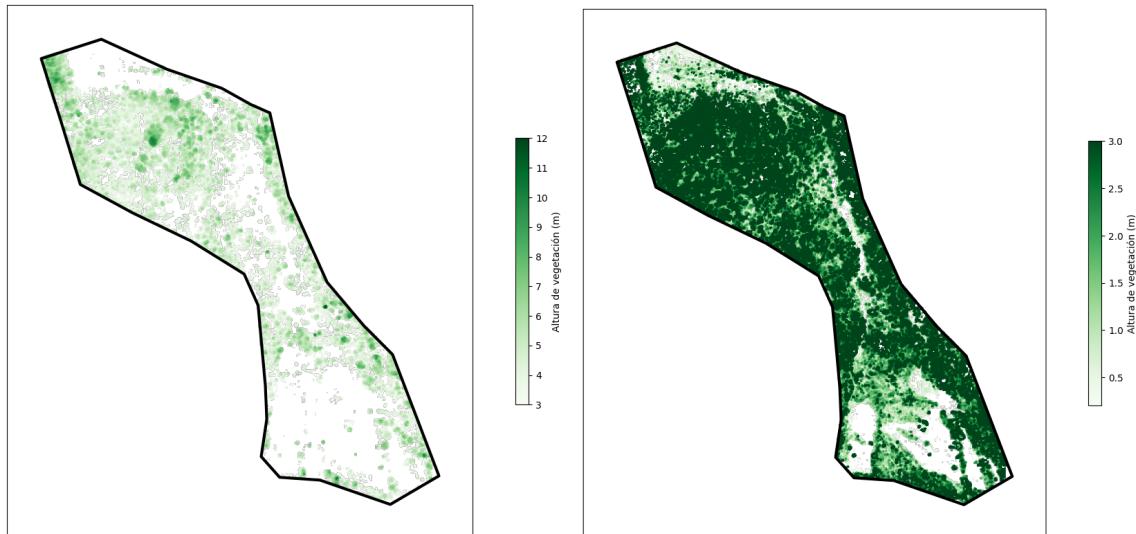
En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el área por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

modelo	area	carga
1	1.37	2.06
2	1.17	8.77
4	2.88	86.40
5	0.05	0.35
6	1.78	22.25
7	6.84	85.50
Total	14.09	205.33

**Figura 43:** Carga de cada modelo de combustible

La carga estimada total es de 205.33 Toneladas

### Vuelo2

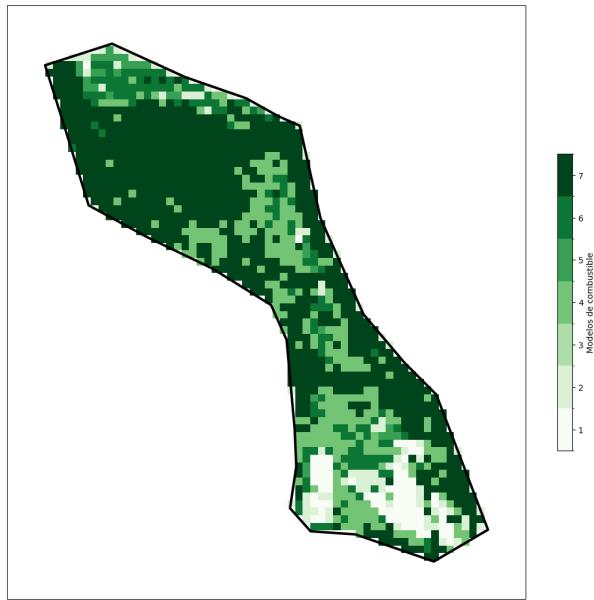


**Figura 44:** A la izqda mapa de arbolado y a la derecha mapa de matorral. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo2.

De la combinación de estos dos mapas de vegetación se obtiene el mapa de modelos de combustible:

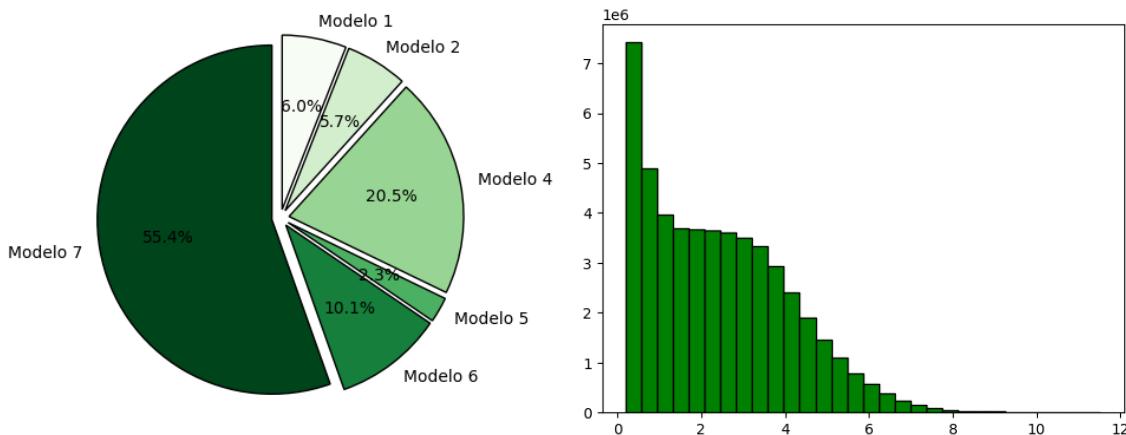
### 3.1 Método de Rothermel.

---



**Figura 45:** Mapa de Modelos de combustible siguiendo la clasificación de Rothermel. Fuente: elaboración propia a partir de datos LiDAR de Vuelo2.

A continuación se muestra un gráfico circular donde se refleja en porcentaje de ocupación del suelo de cada modelo de combustible. También se adjunta un gráfico con el histograma de la distribución de todos los retornos clasificados como vegetación. El eje x del histograma representa la altura respecto al suelo de los retornos:



**Figura 46:** A la izqda figura que muestra porcentaje de cada modelo de combustible, a la dcha histograma de altura de la vegetación de la zona de estudio.

Se observa ligero repunte de retorno de capas bajas de vegetación en el histograma

En la siguiente tabla se calcula la estimación de carga de combustible usando los modelos de Rothermel. Se muestra el modelo de combustible, la superficie que ocupa ese modelo medido en hectáreas y la carga estimada para ese modelo medido en toneladas, que es el resultado de multiplicar el área por el valor en T/ha que estima Rothermel para ese modelo.

### 3.1 Método de Rothermel.

---

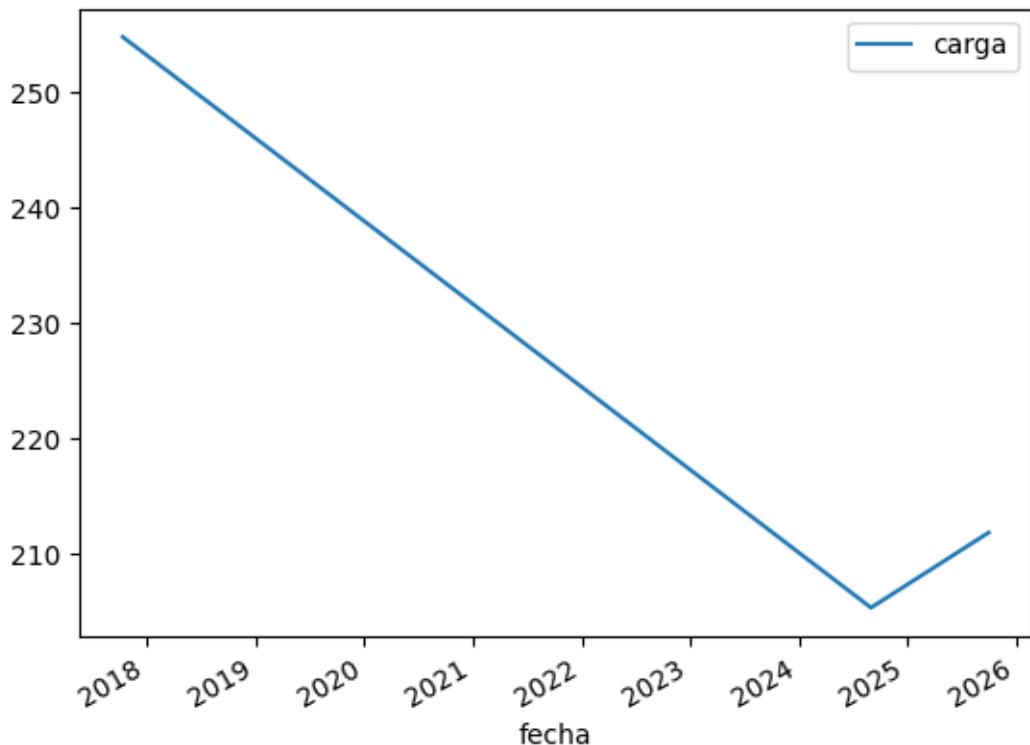
modelo	area	carga
1	0.84	1.26
2	0.81	6.08
4	2.89	86.70
5	0.33	2.31
6	1.42	17.75
7	7.82	97.75
Total	14.11	211.84

**Figura 47:** Carga de cada modelo de combustible

La carga estimada total es de 211.84 Toneladas

#### Análisis de los datos obtenidos para la zona3

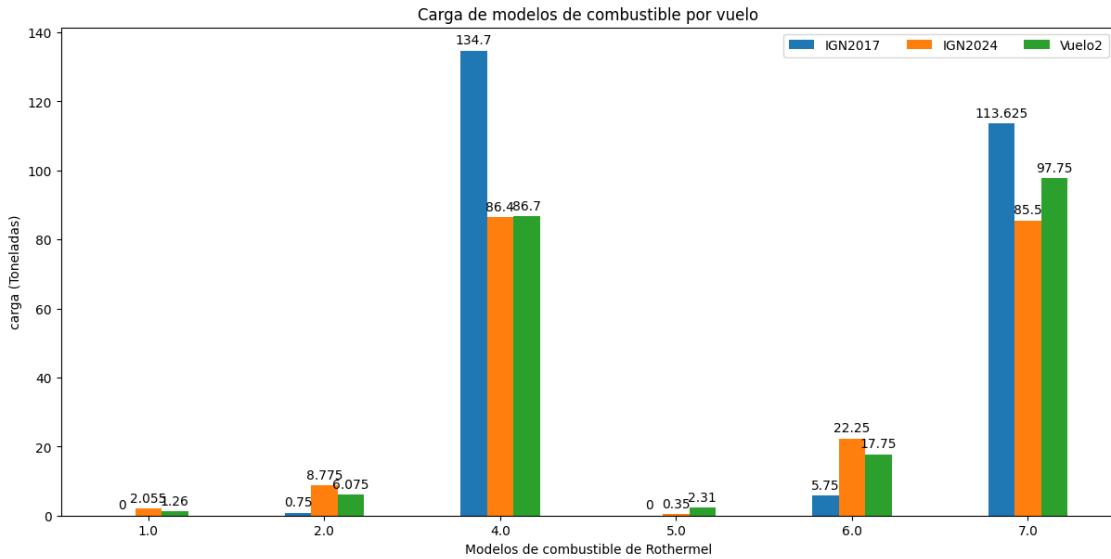
Para analizar la evolución en el tiempo de la biomasa se muestra la siguiente gráfica.



Se observa un descenso de biomasa entre 2017 y 2024, muy probablemente debido a los desbroces practicados en la zona, sobretodo en la parte sur de la parcela) y un ligero repunte entre 2024 y 2025. A continuación se muestra la evolución de los modelos de combustible en los 4 vuelos LiDAR:

### 3.2 Fórmula alométrica

---

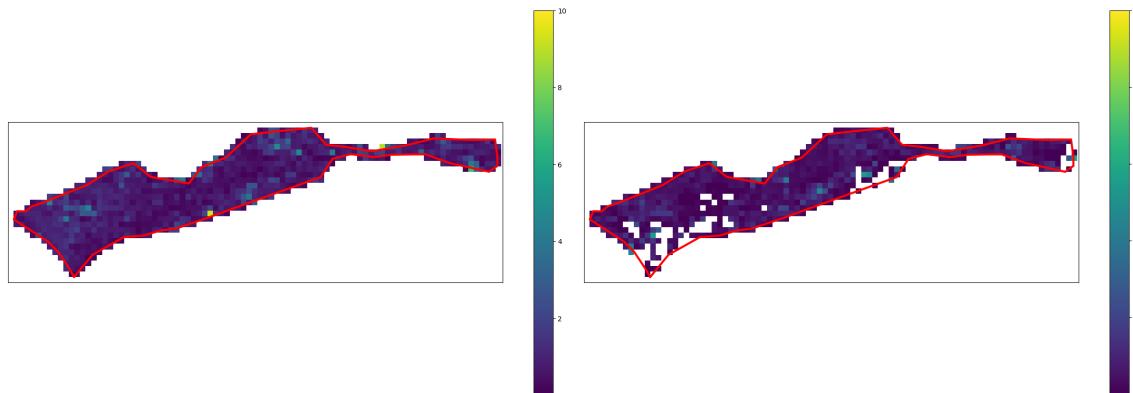


Se muestra descenso de modelo 4 y ligero aumento de modelos de pasto, esta transformación es muy probablemente debida, como ya se ha comentado, a los desbroces realizados en la zona.

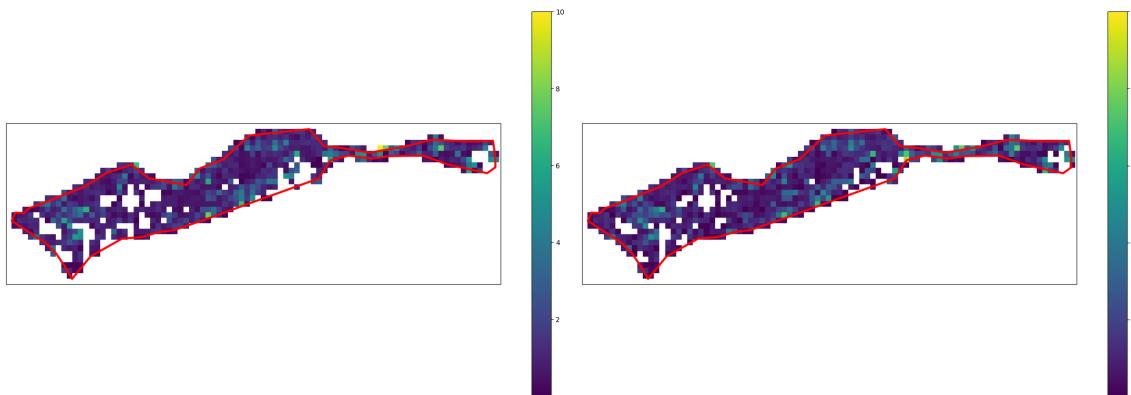
### 3.2. Fórmula alométrica

#### 3.2.1. Zona 1

Se muestra mapa del cálculo de biomasa estimada para cada una de las cuadrículas que conforman la zona 1



**Figura 48:** A la izqda IGN2017 a la dcha IGN2024



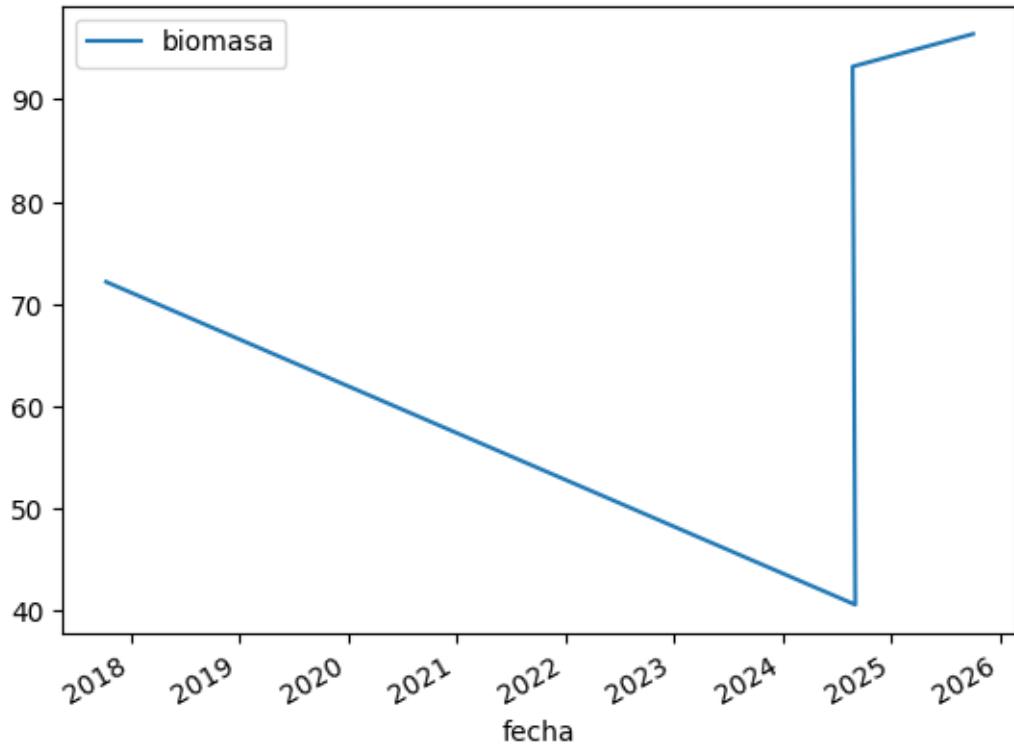
**Figura 49:** A la izqda Vuelo1 a la dcha Vuelo2

Se puede observar que en general la carga de biomasa es mayor en los datos de Vuelo1 y Vuelo2, esto puede ser debido a una influencia en los resultados del sensor LiDAR usado, hay que recordar que los datos IGN2024 tienen una resolución de 5 retornos/m<sup>2</sup>, muy inferior a los 200 retornos/m<sup>2</sup> de los datos de Vuelo1 y Vuelo2.

Se puede observar también en los mapas una carga de biomasa prácticamente nula en las zonas donde se practicaron los desbroces mecanizados. A continuación se adjunta una tabla y una gráfica donde se muestra la evolución de la biomasa en el tiempo.

**Cuadro 1:** Biomasa en cada uno de los vuelos expresada en toneladas

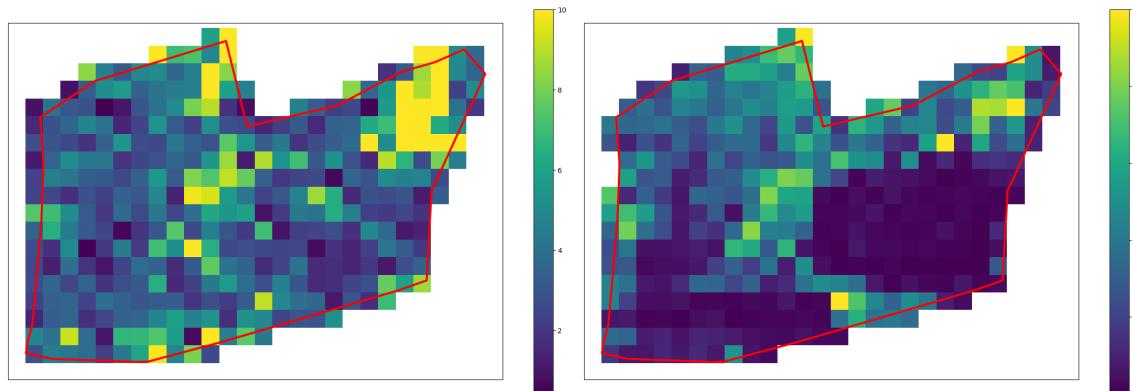
vuelo	fecha	biomasa
IGN2017	10/10/2017	72.149445
IGN2024	01/09/2024	40.576587
Vuelo1	23/08/2024	93.208569
Vuelo2	02/10/2025	96.398699



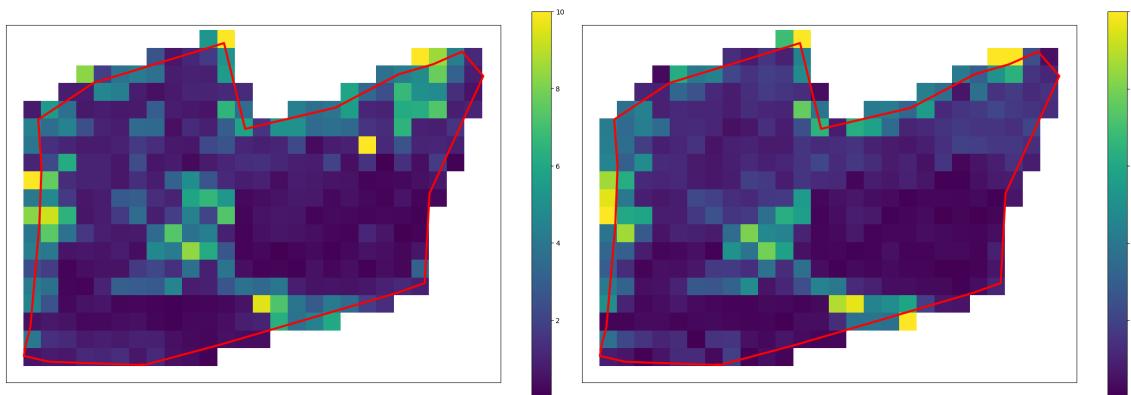
Se puede observar una subestimación de la biomasa en el vuelo IGN2024. Esto, como ya se ha comentado, puede ser debido a una influencia del sensor LiDAR usado.

### 3.2.2. Zona 2

Se muestra mapa del cálculo de biomasa estimada para cada una de las cuadrículas que conforman la zona 2



**Figura 50:** A la izqda IGN2017 a la dcha IGN2024

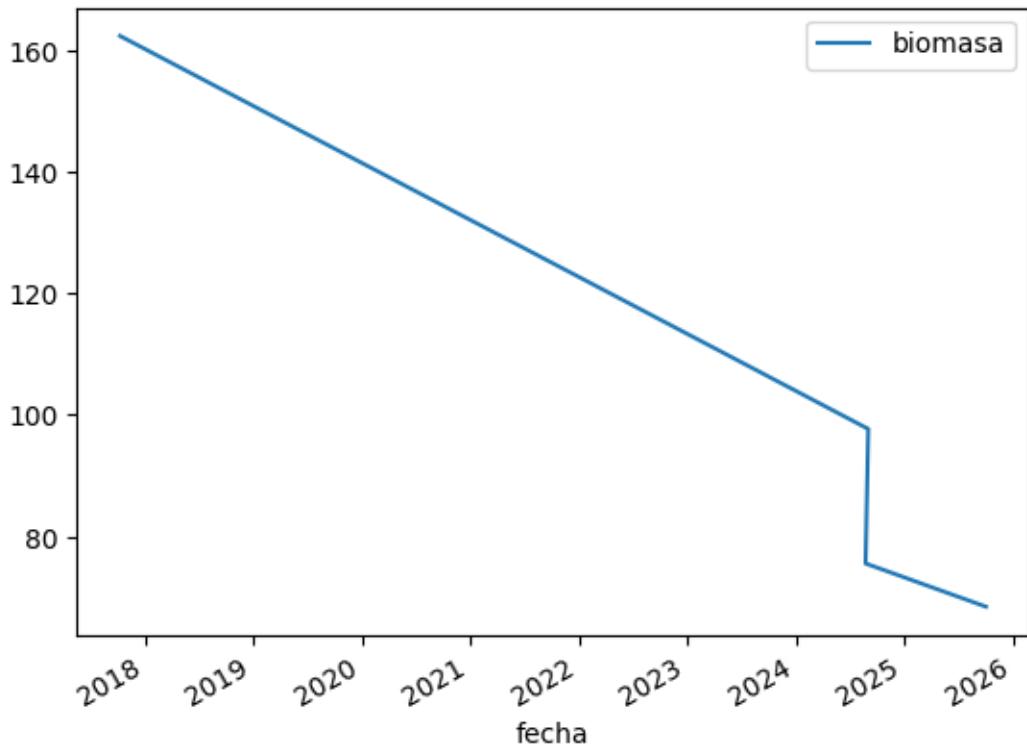


**Figura 51:** A la izqda Vuelo1 a la dcha Vuelo2

Se muestra una disminución de la biomasa a lo largo del tiempo. La tabla y gráfica siguiente lo corroboran.

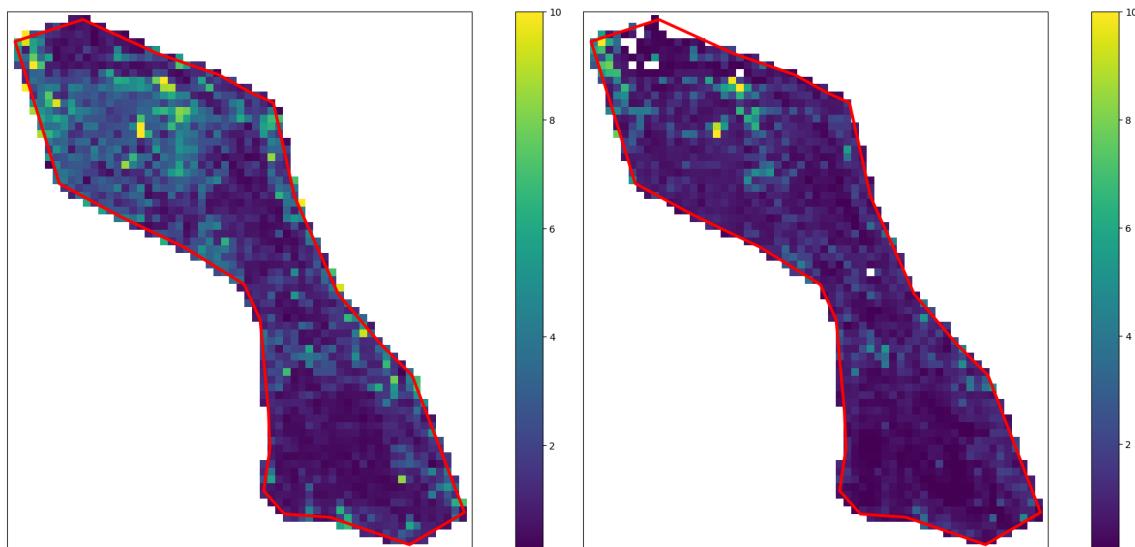
**Cuadro 2:** Biomasa en cada uno de los vuelos expresada en toneladas

vuelo	fecha	biomasa
IGN2017	10/10/2017	162.277239
IGN2024	01/09/2024	97.683977
Vuelo1	23/08/2024	75.567945
Vuelo2	02/10/2025	68.465645

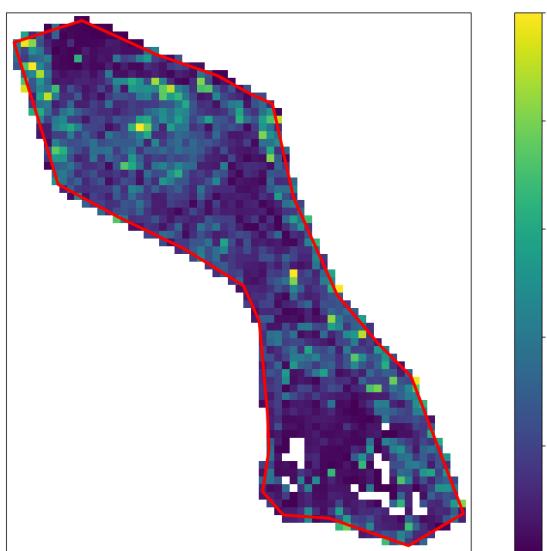


#### 3.2.3. Zona 3

Se muestra mapa del cálculo de biomasa estimada para cada una de las cuadrículas que conforman la zona 3



**Figura 52:** A la izqda IGN2017 a la dcha IGN2024



**Figura 53:** Vuelo2

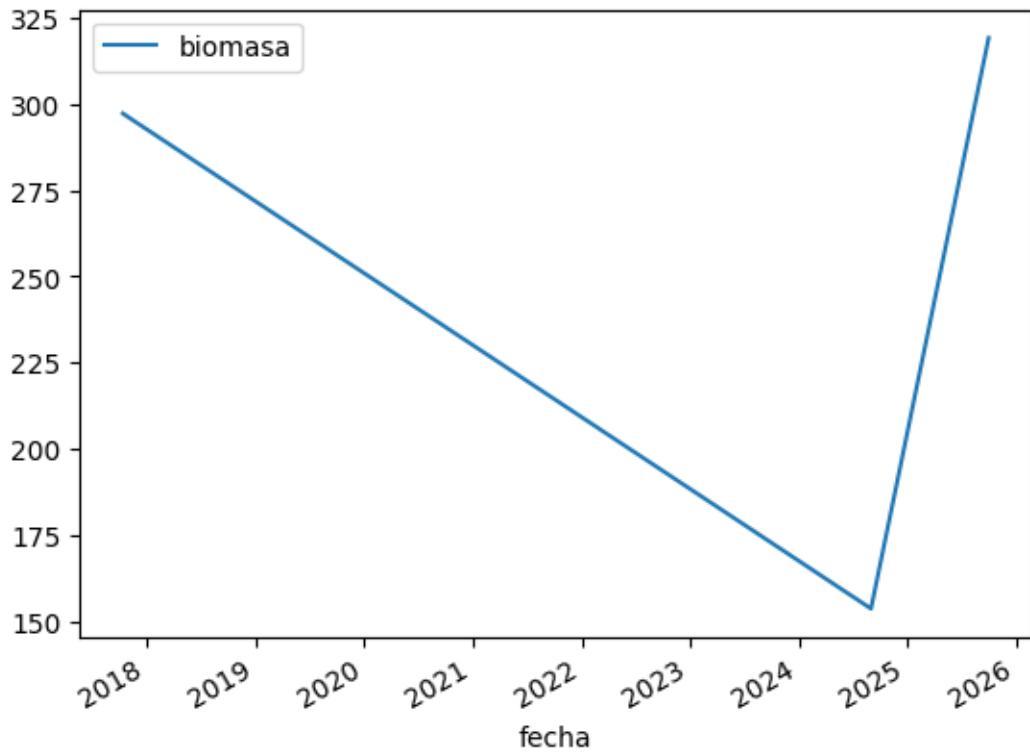
En la zona sur de la parcela se aprecia la reducción de biomasa debido a los desbroces mecanizados y al igual que en la zona 1 se muestra una subestimación de biomasa en los datos de IGN2024. Esto se corrobora con los datos de la tabla y gráfica siguiente, donde se muestran los datos de biomasa total, medido en toneladas, en cada vuelo.

**Cuadro 3:** Biomasa en cada uno de los vuelos expresada en toneladas

vuelo	fecha	biomasa
IGN2017	10/10/2017	297.246134
IGN2024	01/09/2024	153.754563
vuelo2	02/10/2025	319.153095

### 3.3 Perfil de nube de puntos

---



#### 3.3. Perfil de nube de puntos

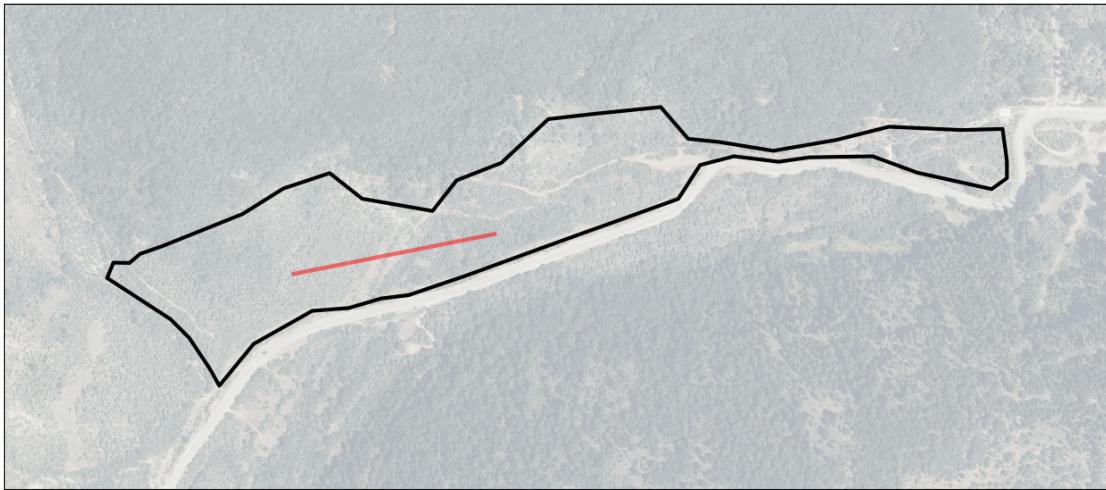
Para analizar la influencia de la carga ganadera en las zonas de desbroce, se ha optado por realizar un perfil de la nube de puntos y ver la evolución de esa zona en el tiempo. Los resultados para cada zona se muestran a continuación.

##### 3.3.1. Zona 1

Se muestra un mapa de la localización del transecto donde se va a levantar la nube de puntos. Se ha elegido este transecto puesto que corta a las zonas donde se ha realizado desbroce mecanizado

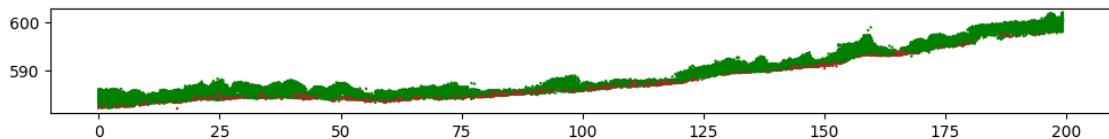
### 3.3 Perfil de nube de puntos

---

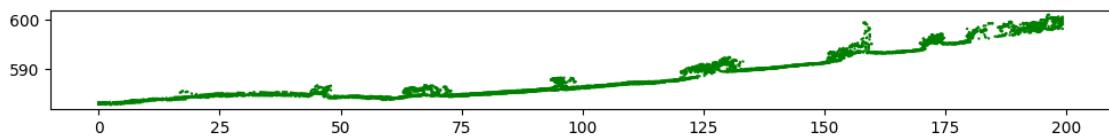


**Figura 54:** Localización del perfil de nube de puntos dentro de la zona 1

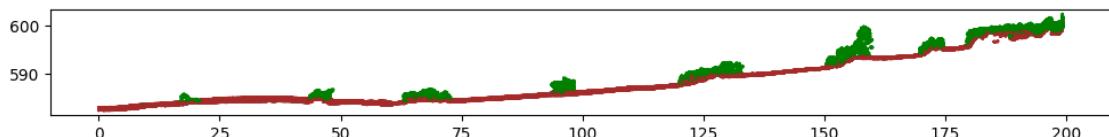
A continuación se muestran los perfiles de nubes de puntos para cada uno de los vuelos LiDAR:



**Figura 55:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos IGN2017



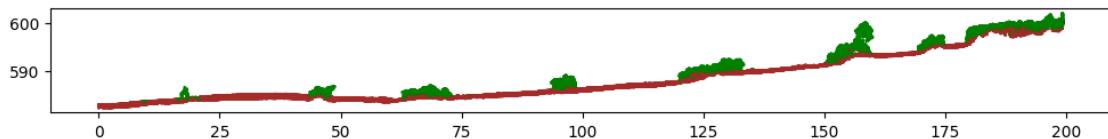
**Figura 56:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos IGN2024



**Figura 57:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos Vuelo1

### 3.3 Perfil de nube de puntos

---

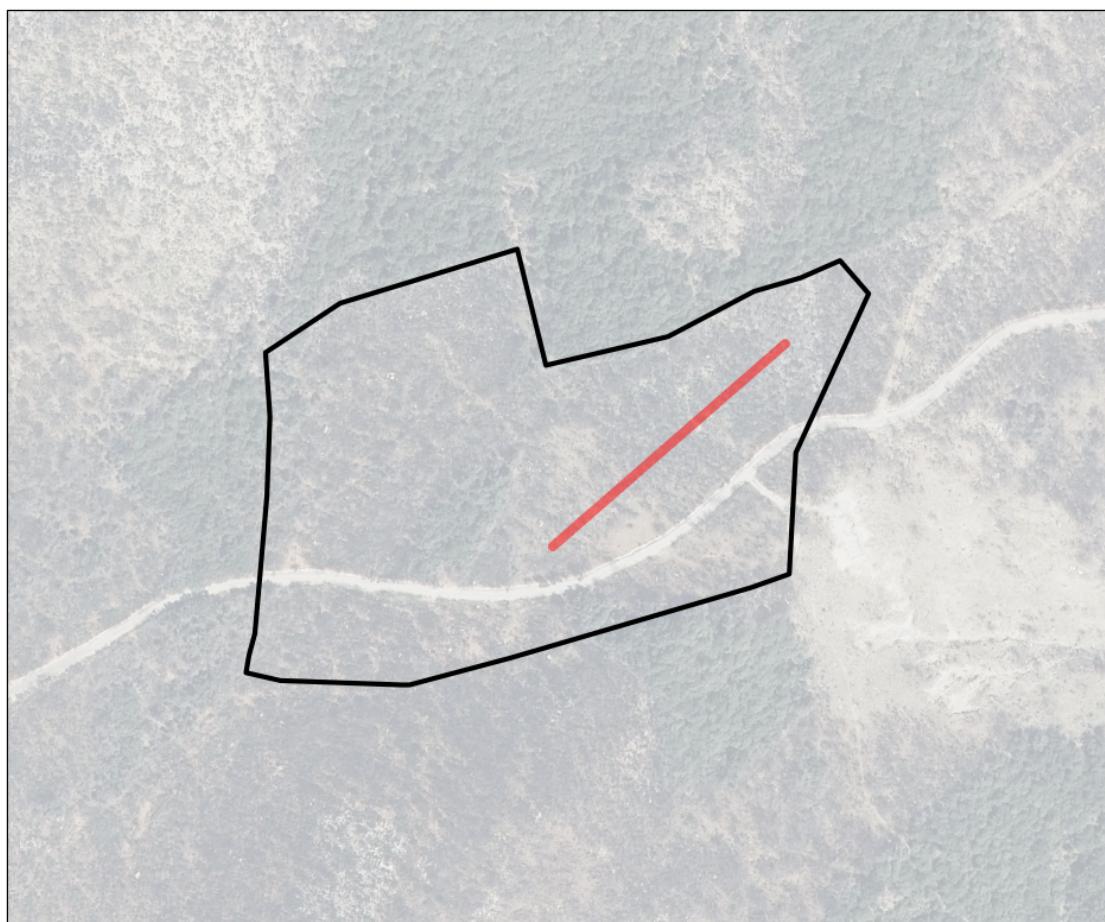


**Figura 58:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos Vuelo2

Se puede apreciar la diferencia de vegetación entre los datos del primer vuelo y los datos de los otros 3 vuelos, en los que se observa zonas desprovistas de vegetación en las zonas donde se ha realizado un desbroce mecánico. En los datos de Vuelo2 no se aprecian puntos de retorno clasificados como vegetación en las zonas de desbroce, por lo que se puede decir que la carga ganadera está ayudando a mantener esa zona desprovista de vegetación y está realizando una labor desde el punto de vista de la prevención de incendios forestales.

#### 3.3.2. Zona 2

Se muestra un mapa de la localización del transecto donde se va a levantar la nube de puntos. Se ha elegido este transecto puesto que es una de las zonas más afectadas por el incendio de 2022

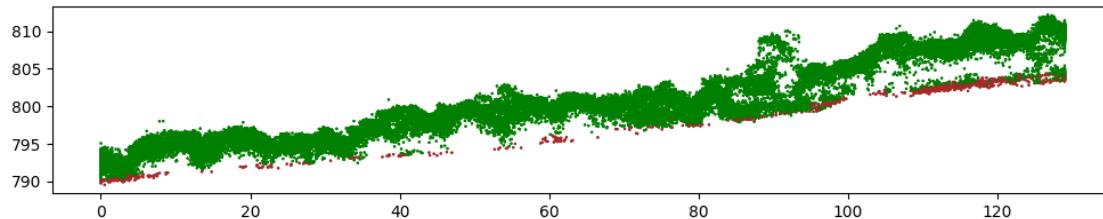


**Figura 59:** Localización del perfil de nube de puntos dentro de la zona 2

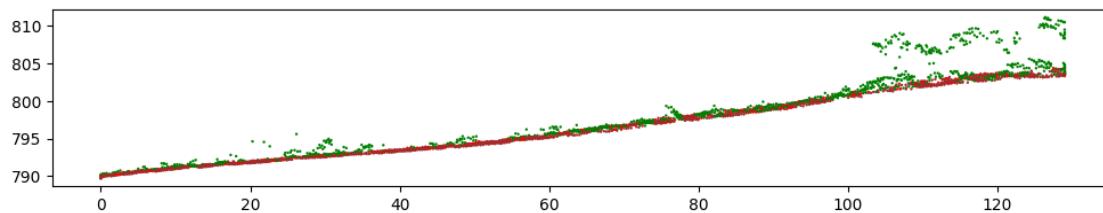
### 3.3 Perfil de nube de puntos

---

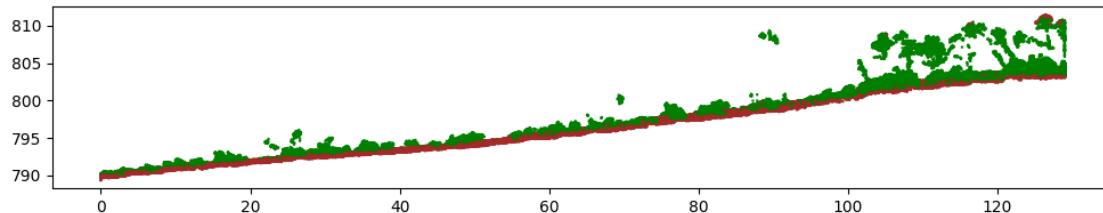
A continuación se muestran los perfiles de nubes de puntos para cada uno de los vuelos LiDAR:



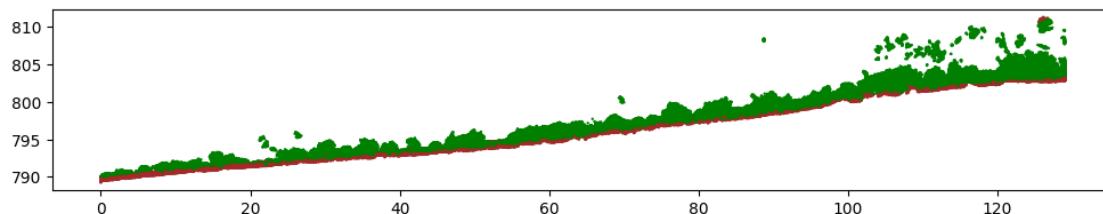
**Figura 60:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos IGN2017



**Figura 61:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos IGN2024



**Figura 62:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos Vuelo1

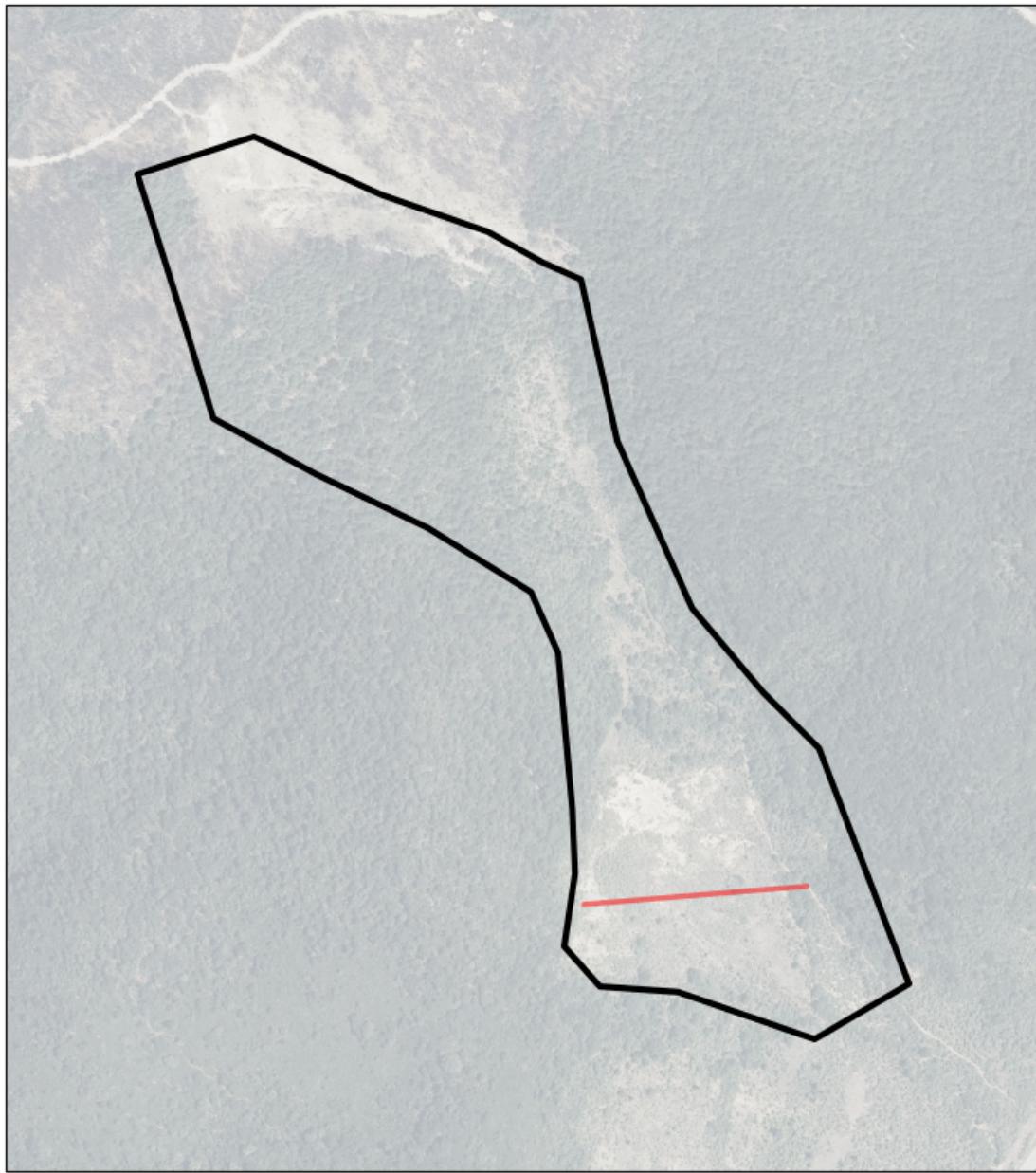


**Figura 63:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos Vuelo2

Entre los datos de IGN2017 y los datos de IGN2024 se aprecia claramente la disminución de vegetación debido al incendio de 2022. En los siguientes vuelos se observa que la vegetación sigue creciendo tanto en zonas descubiertas de arbolado como en las cubiertas. Quizás se deba a una carga de ganado insuficiente.

### 3.3.3. Zona 3

Se muestra un mapa de la localización del transecto donde se va a levantar la nube de puntos. Se ha elegido este transecto puesto que corta a las zonas donde se ha realizado desbroce mecanizado

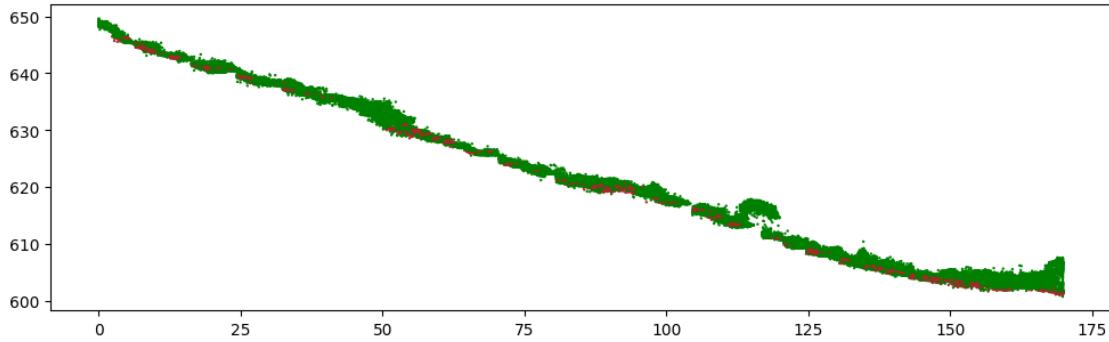


**Figura 64:** Localización del perfil de nube de puntos dentro de la zona 3

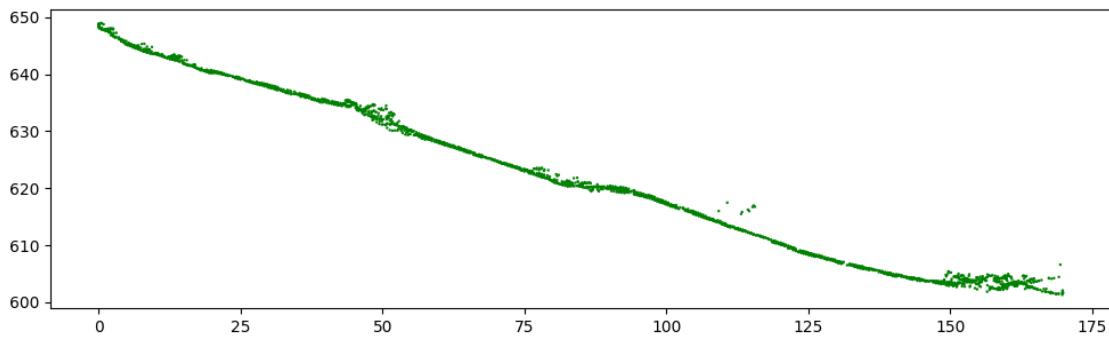
A continuación se muestran los perfiles de nubes de puntos para cada uno de los vuelos LiDAR:

### 3.3 Perfil de nube de puntos

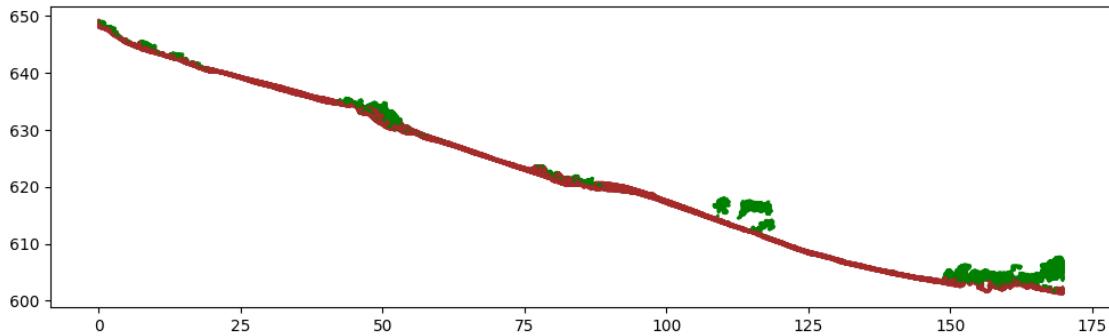
---



**Figura 65:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos IGN2017



**Figura 66:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos IGN2024



**Figura 67:** Perfil de puntos, puntos marrones son los clasificados como suelo y los verdes como vegetación. Fuente elaboración propia a partir de datos Vuelo2

Se puede hacer una lectura muy similar a la zona 1. Se observa una disminución de vegetación entre IGN2017 e IGN2024 y en los dato del Vuelo2 no se observa que haya vuelto a brotar la vegetación en las zonas desbrozadas, quizás debido a la carga ganadera.

---

## 4. CONCLUSIONES

Se han usado dos metodologías distintas para analizar la evolución de biomasa en 3 parcelas en las que la vegetación ha sufrido una serie de perturbaciones y en las que se ha introducido ganado vacuno. Los datos LiDAR han sido capaces de identificar y cuantificar dichas perturbaciones, si bien es cierto que el valor de la cuantificación depende de la metodología empleada.

Con los datos mostrados se puede decir que la metodología basada en los modelos de Rothermel sirve para analizar la vegetación desde una perspectiva de prevención de incendios forestales, mientras que la metodología basada en una fórmula alométrica da un resultado más preciso de la carga de biomasa, aunque hay que destacar que esta metodología es sensible al sensor LiDAR usado (se han obtenido subestimaciones de biomasa con los datos de IGN2024 que usa una resolución de 5 retornos/m<sup>2</sup>).

## Referencias

- [1] Jon E. Keeley. Fire intensity, fire severity and burn severity: a brief review and suggested usage, 2009.
- [2] ESA/Copernicus. Imágenes del satélite sentinel-2 proporcionados por la agencia espacial europea (esa), 2022. URL: <https://www.copernicus.eu/>.
- [3] Instituto Geográfico Nacional. Plan nacional de ortofotografía aérea, 2017-. URL: <https://pnoa.ign.es>.
- [4] Richard C. Rothermel. A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels, 1972.
- [5] María Soledad Fernández Contreras. Creación de un método de obtención de mapas de combustible a partir de datos lidar con validación en campo, 2019.
- [6] Luís Filipe Rosa Simões. Lidar based biomass estimation system for forested areas, 2020.