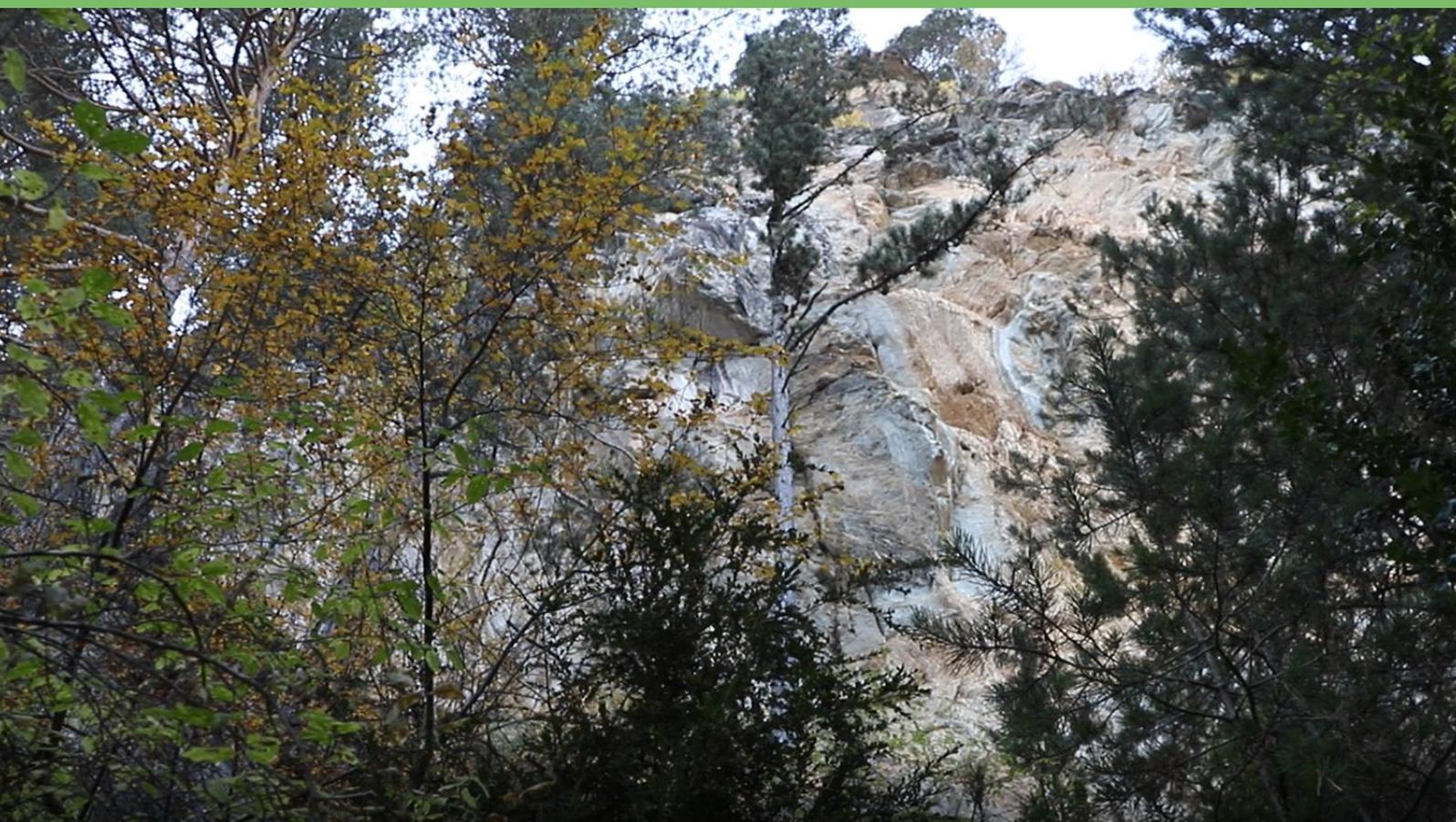


# INFORME TÉCNICO DE PRUEBA PILOTO

Acciones de prevención de riesgo de incendios forestal y mejora de la función protectora del bosque frente a la erosión y la caída de bloques y rocas en Andorra



## RESUMEN EXECUTIVO DE LA MEMORIA

El presente informe sintetiza el procedimiento realizado para la caracterización de un bosque protector y de su vulnerabilidad a los incendios forestales, para a continuación realizar una actuación de gestión forestal preventiva que permita reducir el peligro de incendios de alta severidad, y maximizar su rol protector ante la caída de bloques rocosos. Dicha actuación se ha diseñado en base a distintas simulaciones de comportamiento del fuego e incendio presumibles, con el fin de implementar la mejor medida preventiva en un área aproximada de 1 ha de un bosque protector de bloques y rocas del Principado de Andorra.

El servicio se ha realizado por la empresa andorrana “e-forestland / ingeniería y trabajos forestales” bajo la oferta de contratación pública dirigida por GEIE-FORESPIR con fecha 08/02/2021, en el marco del proyecto INTERREG SUDOE **SOE3/P4/E0874** MONTCLIMA “CLIMA Y RIESGOS NATURALES EN LAS ZONAS DE MONTAÑA SUDOE” y con el apoyo del socio asociado al proyecto y Miembro de FORESPIR, Andorra Recerca + Innovació

Andorra la Vella, noviembre del 2021.

# CONTENIDO

<b>1 - EL BOSQUE DE DEFENSA CONTRA LOS RIESGOS NATURALES .....</b>	<b>3</b>
1.1 BOSQUES CON FUNCIÓN PROTECTORA : INFRAESTRUCTURA DE DEFENSA VERDE .....	3
1.2 RETROSPECTIVA DE LOS BOSQUES PROTECTORES .....	3
1.3 EL BOSQUE PROTECTOR DE BLOQUES Y ROCAS .....	4
1.4 INTERACCIÓN DE RIESGOS: LOS INCENDIOS FORESTALES Y LA CAIDA DE ROCAS Y BLOQUES .....	5
<b>2. CASO DE ESTUDIO EN ANDORRA – EL BOSQUE PROTECTOR DELS MAIANS .....</b>	<b>7</b>
2.1 OBJETIVO DE LA ACTUACIÓN.....	7
2.2 ÁREA DE ESTUDIO.....	7
2.3 CARACTERÍSTICAS BIO-FÍSICAS DE LA ZONA.....	9
<b>3. CARACTERIZACIÓN DEL GRADO DE PROTECCIÓN DEL BOSQUE FRENTE A LA CAIDA DE ROCAS y BLOQUES .....</b>	<b>12</b>
3.1 ANÁLISIS DEL RIESGO DE CAÍDA DE ROCAS.....	13
3.2 ANÁLISIS DEL GRADO PROTECTOR ACTUAL DEL BOSQUE.....	14
3.3 ANÁLISIS DEL GRADO PROTECTOR FUTURO DEL BOSQUE.....	15
3.4 AMENAZAS DE LA MASA FORESTAL .....	15
<b>4. CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LOS INCENDIOS FORESTALES .....</b>	<b>17</b>
<b>5. MEDIDAS DE MITIGACIÓN – SELVICULTURA PREVENTIVA .....</b>	<b>20</b>
<b>6. REFERENCIAS.....</b>	<b>26</b>

# 1. EL BOSQUE DE DEFENSA CONTRA LOS RIESGOS NATURALES

## 1.1 BOSQUES CON FUNCIÓN PROTECTORA – INFRAESTRUCTURA DE DEFENSA VERDE

Un bosque con función protectora es aquel cuyas características (composición específica, dimensiones, densidad, etc.; en relación al estrato arbóreo) y localización (piso montano y / o subalpino con pendientes pronunciadas), ejerce una protección efectiva de los asentamientos humanos e infraestructuras expuestas a los impactos de algún riesgo natural; mayoritariamente de origen gravitatorio (aludes, caída de bloques, movimientos en masa, etc.) y / o evento climático adverso (tormentas, vendavales, etc.). Por lo tanto, la clasificación de un bosque como protector o de defensa, implica la presencia y coincidencia en el espacio y el tiempo de (i) un asentamiento humano expuesto a un peligro natural, (ii) la ocurrencia plausible de un determinado riesgo natural con efectos devastadores sobre el bien o población, y (iii) la existencia de un bosque con el potencial de prevenir la generación del riesgo o bien mitigar sus efectos negativos sobre bienes y servicios civiles.

Los términos "protección" o "defensa" indican exclusivamente la capacidad del bosque para salvaguardar los valores humanos y económicos de un emplazamiento ante un determinado riesgo natural. A pesar de que las perturbaciones naturales forman parte de las dinámicas ecológicas propias del paisaje y sus ecosistemas, la efectividad del grado de defensa proporcionado depende del tipo de perturbación natural involucrada, de la frecuencia e intensidad del evento, así como el estado del bosque. Los tres factores están estrechamente relacionados, conformando el régimen natural de la perturbación.

La función protectora del bosque, a pesar de ser la dominante, no excluye otras de igual importancia tanto para la sociedad civil como para el propio ecosistema (función productiva, social, ecológica, etc.). No obstante, estas otras quedan relegadas en orden de importancia al estatus del bosque protector, pues resulta la función más costo eficiente desde una perspectiva de prevención y mitigación del riesgo.

## 1.2 RETROSPECTIVA DE LOS BOSQUES PROTECTORES

La historia de los bosques protectores y el reconocimiento de su importancia socioeconómica está estrechamente relacionada con la evolución del uso tradicional del territorio de cada región hasta la actualidad. A medida que la colonización de nuevas zonas alpinas intensificaba, la explotación y extracción de productos forestales, así como la creciente demanda de nuevas áreas de cultivos y pastos, resultó en una disminución generalizada de la superficie boscosa partes de las zonas montañosas. La pérdida de la cubierta forestal propició la exposición de asentamientos humanos a los efectos devastadores riesgos naturales, con fatídicos resultados como el caso de la región del Trento con más de 9000 muertes debido a

los aludes durante diciembre de 1916. Ante la urgencia de la situación, se implementaron una serie de medidas para proteger aquellos bosques remanentes y /o reforestar los desaparecidos, que localizándose ladera arriba de los asentamientos, ofrecieran una protección al riesgo.

Los primeros indicios sobre los bosques de defensa aparecen a finales de la Edad Media con las cartas u órdenes prohibitivas ("Bannbriefe" o "lettres bando") promulgadas para prohibir o regular la explotación de un determinado bosque dada su importancia manifiesta, quedando reservado este derecho a una persona o comunidad determinada. Los ejemplos más antiguos de estas servidumbres escritas provienen del antiguo País de Schwytz y de los Valles de Uri con dos casos específicamente referidos a bosques con función protectora - la Orden del año 1382 para la protección contra la caída de bloques en el pueblo de Flüelen y la Orden de 1397 para la protección contra los aludes en el pueblo de Adels Andermatt.

Sin embargo, el término "bosque protector" entendido como en la actualidad, aparece por primera vez en 1852 al Acta Forestal de Bavaria, bajo el nombre "Schutzwaldungen" (bosques protegidos), cuya conservación se considera especialmente necesaria para la sociedad, y a los que se les atribuye una relación directa con la prevención de algunos riesgos naturales.

### 1.3 EL BOSQUE PROTECTOR DE BLOQUES Y ROCAS

Los desprendimientos de rocas y los deslizamientos de tierra son dinámicas naturales típicas de zonas montañosas y abruptas, consistente en la caída libre o movilización de bloques formados por fragmentación; debido a la acción de la erosión de la roca madre y a su movilización por el efecto de la gravedad. La ocurrencia de los desprendimientos depende principalmente de la pendiente, la geología, la meteorización, el clima local y la vegetación, así como de la exposición a actividades humanas o terremotos.

Hablamos de "caída de rocas" cuando la unidad de volumen considerada es del orden de diez centímetros cúbicos y de "caída de bloques" cuando es del orden de 1 a 100 m<sup>3</sup>.

Cuando los bloques se sueltan de la zona de inicio o generación; ya sea un acantilado o una morrena, generalmente inician una trayectoria, transcurriendo la zona de propagación o de tránsito, siguiendo la línea de mayor pendiente. Finalmente, se detienen en la zona de sedimentación, correspondiendo a aquella con menor pendiente donde la roca disipa su energía cinética y finalmente se detiene.

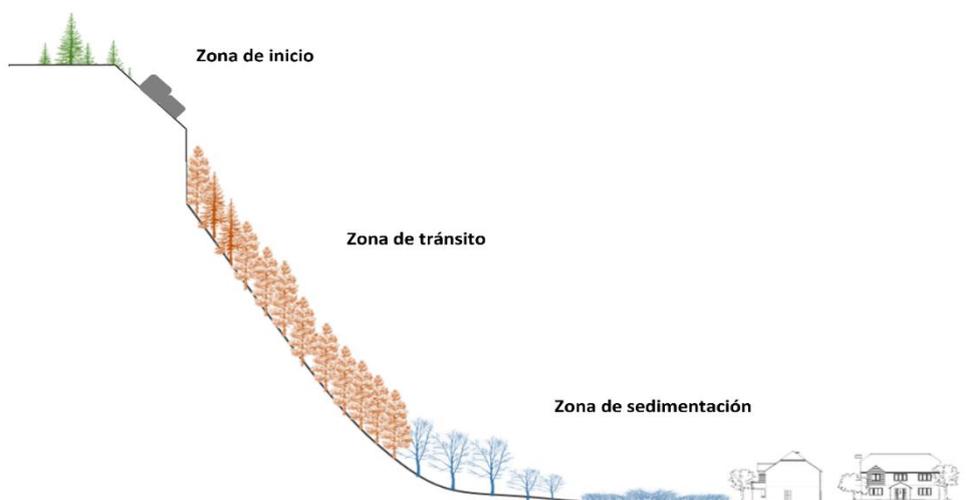


Figura 1: zonificación de un bosque protector de bloques. Fuente: Elaboración propia

La posición de la zona de inicio en la vertiente, la topografía, el volumen de los bloques y la naturaleza de la cobertura superficial del suelo (vegetación u otra) influirán en gran medida en las distancias recorridas por los bloques. En este sentido, la influencia de la cubierta forestal en la ocurrencia del desprendimiento y sobre todo en la intensidad de sus impactos, generalmente se encuentra en la zona de tránsito, donde las velocidades y distancias de rebote de las rocas alcanzan su máximo (Dorren 2016). Sin embargo, la distancia de recorrido de la roca depende de la disipación total de energía, que ocurre principalmente debido a la colisión de la roca con la superficie del suelo (capacidad de amortiguamiento) y / o con la vegetación; especialmente las estructuras boscosas.

Tanto en las zonas de tránsito como en las de depósito, un bosque protector es eficaz para reducir la velocidad y, por lo tanto, las alturas de rebote de las rocas movilizadas (Corona et al. 2017). Sin embargo, en caso de derrumbes o caídas de grandes bloques en una pendiente pronunciada, los árboles no tendrán ningún efecto para detener el fenómeno, pero aún podemos considerar que el estado boscoso es más efectivo que el terreno desnudo. Tal es así, que algunos autores señalan que la frecuencia de desprendimiento de rocas se puede reducir entre aproximadamente un 10 y un 90% y la intensidad del desprendimiento entre un 10 y un 70%, en comparación con las condiciones no boscosas.

Finalmente, cabe considerar el tipo y características de la estructura forestal, que tendrá un efecto muy significativo sobre la capacidad de mitigar el riesgo de impacto de las rocas y bloques sobre los bienes expuestos. Así pues, algunos autores como Scheidl (Scheidl et al 2020) apuntan que las estructuras dominadas por frondosas; especialmente hayas y robles, resultan más eficiente que las coníferas (dominada por especies de luz) en la reducción del riesgo. Sin embargo, los rodales mixtos (coníferas-frondosas) presentan la mayor reducción de riesgo. Otra característica significativa es que la cantidad de impactos contra un árbol resulta más importante que la energía disipada creada por el impacto. En este sentido, resulta más influyente la densidad y área basimétrica del rodal que la presencia de tallos de grandes dimensiones.

#### **1.4 INTERACCIÓN DE RIESGOS: LOS INCENDIOS FORESTALES Y LA CAIDA DE ROCAS Y BLOQUES**

El clima es uno de los principales responsables en la caracterización del régimen y la dinámica de las perturbaciones naturales. Consecuentemente, con el avance del cambio climático muchas perturbaciones experimentarán drásticos cambios en la forma de expresarse e interactuar, situación que supondrá nuevos retos para los ecosistemas (Plana et al., 2018).

En el ámbito del Pirineo, el Observatorio Pirenaico del Cambio Climático (OPPC) está implementando distintas líneas de investigación para diagnosticar los principales efectos del cambio climático sobre los bosques y ofrecer herramientas para la toma de decisión que permitan orientar las políticas forestales, así como su transposición efectiva mediante itinerarios silvícolas a disposición de los gestores forestales.

Las proyecciones climáticas, escenarios SRES del IPCC (Nakicenovic, 2000), auguran un incremento generalizado del riesgo de incendio en todo el sur de Europa como consecuencia del (i) aumento en frecuencia de las olas de calor o número de noches tropicales; (ii) aumento de la sequía estival; (iii) disminución del contenido de humedad del suelo; (iv) incremento del número de días secos consecutivos; y (v) una ligera disminución de la humedad relativa (Jacob et al., 2013, Christensen et al., 2013). Debido a estas nuevas condiciones climáticas más favorables para el desarrollo y propagación del fuego, el peligro de incendio podría aumentar considerablemente a

lo largo del siglo XXI, tanto en la duración de la época de peligro potencial como en la intensidad y severidad de este. Es presumible un incremento significativo del grado de afectación; en referencia a la mortalidad de las masas forestales, que en numerosas ocasiones no podrán resistir esta nueva dinámica de perturbación y entrarán en fases de degradación creando otras formaciones vegetales menos susceptibles (bosques de rebrote, matorrales, pastizales, etc.).

En esta situación, la función protectora del bosque ante la caída de bloques i rocas queda en entredicho, dado que, las condiciones propicias para el desarrollo de incendios de alta severidad podrían suponer la pérdida parcial o total de la cubierta forestal arbolada, dejando expuestos los bienes a los impactos del riesgo durante un largo período; al menos hasta que el bosque se restablezca durante los próximos 40 años.

La afectación de la masa forestal, en términos de mortalidad y vitalidad a nivel de rodal, propiciará la aparición y propagación de perturbaciones bióticas (plagas de escoltidos, principalmente) con potencial afectación a bosques circundantes, generando una situación crítica a nivel de paisaje. La retroalimentación e interacción entre perturbaciones enfatiza la necesidad de analizar y planificar la gestión de los bosques protectores desde una perspectiva multi-riesgo, con el objetivo de mitigar los efectos potenciales del cambio climático y salvaguardar su funcionalidad.

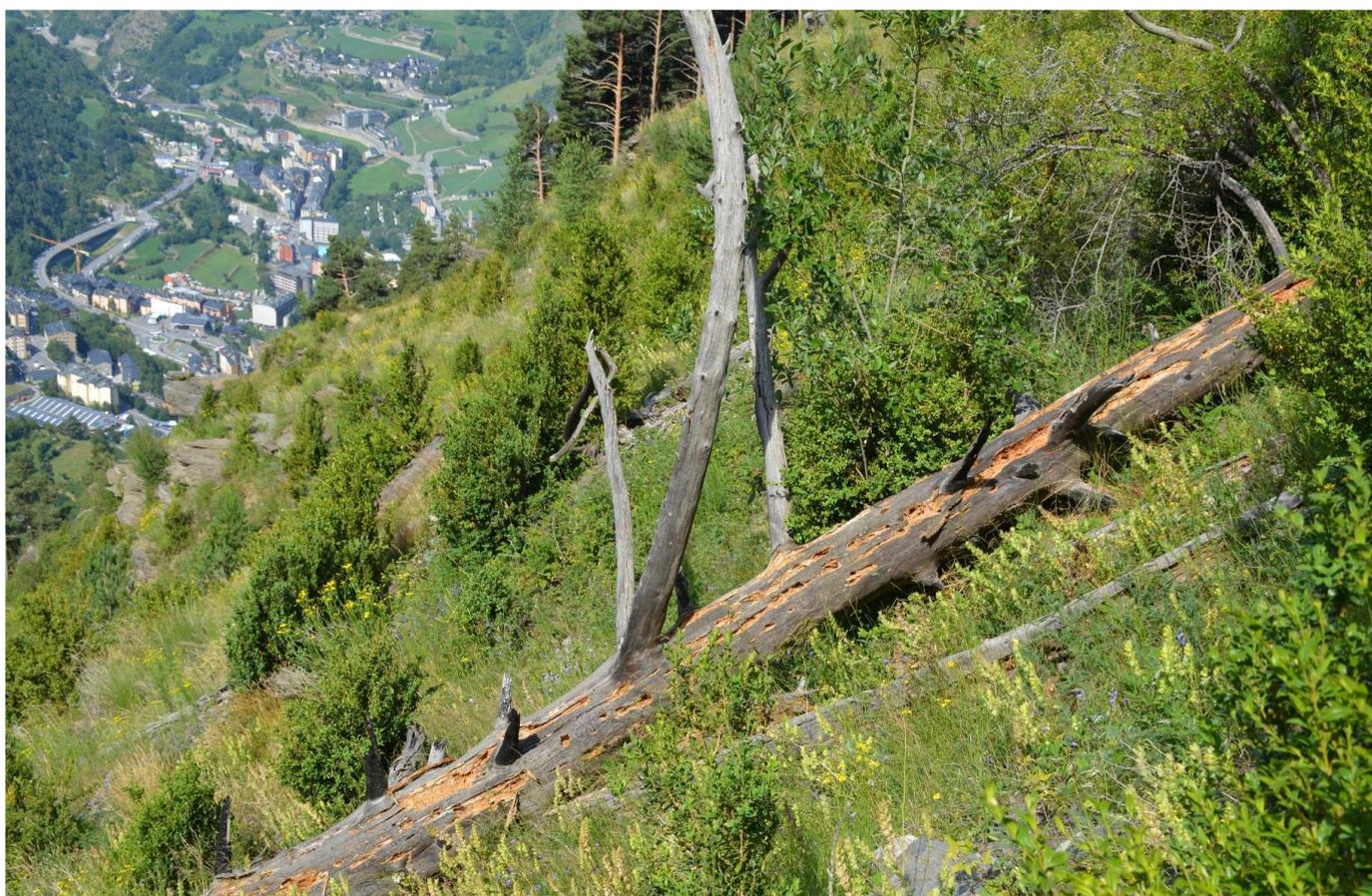


Foto 1: Bosque protector de aludes afectado por un incendio en la zona de Encamp; Andorra.  
Fuente: Propia.

## 2. CASO DE ESTUDIO EN ANDORRA – EL BOSQUE PROTECTOR DELS MAIANS

### 2.1 OBJETIVO DE LA ACTUACIÓN

El principal objetivo es la planificación y realización de una acción de gestión forestal adaptativa en un bosque de protección de bloques y rocas, y vulnerable a los incendios de alta intensidad en Andorra. Asimismo, servirá como bosque piloto y demostrativo de las buenas prácticas en silvicultura preventiva, con el fin de mejorar el conocimiento de dichas estructuras forestales frente a los impactos previsibles del riesgo de incendio, y permitir a los gestores forestales del Pirineo aplicar las técnicas que fomenten el incremento de la resiliencia de los bosques protectores.

Se ha planificado y realizado una acción que permita minimizar el riesgo de incendios, a corto y medio plazo, mediante la disminución de la capacidad de propagación en alta intensidad del fuego, muy especialmente de su capacidad de afección al dosel arbóreo, sin afectar la capacidad o el grado de protección de la estructura forestal frente a la caída de rocas. Con esto, se disminuye la mortalidad forestal y consecuentemente se asegura la continuidad de la función protectora.

Los tratamientos silvícolas se han centrado mayoritariamente en el estrato arbustivo y las ramas inferiores de los árboles, siendo estos dos componentes el principal motor de propagación del fuego entre el suelo y el dosel arbóreo (combustible de escalera o transferencia vertical). Por un lado, se ha realizado un tratamiento de desbroce selectivo y una poda generalizada en una superficie aproximada de 1 ha. Asimismo, se han realizado claros selectivos para favorecer el crecimiento de las especies frondosas del lugar, y se ha realizado un desbroce del matorral alrededor de los pies menores o regenerado de coníferas para maximizar su supervivencia y viabilidad futura.

### 2.2 ÁREA DE ESTUDIO

El monte objeto de estudio es el “Bosc del Maians”, situado en la zona de la “Obaga” al sur de la Parroquia de Andorra la Vella; Principado de Andorra. El centro del rodal de bosque se localiza en las coordenadas (WGS84 UTM31N) X: 378033, Y: 4705114.

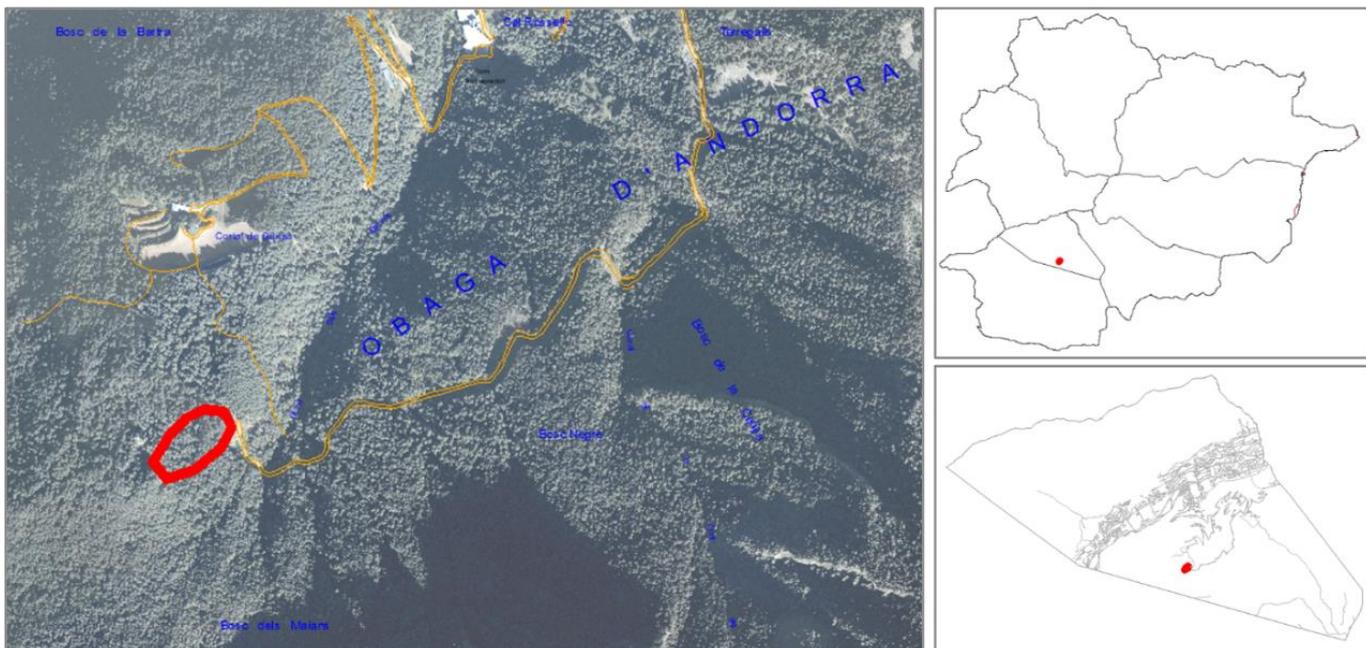


Figura 2: Localización general del “bosc dels Maians”. Fuente: Elaboración propia

El rodal, completamente de titularidad pública – ayuntamiento de Andorra la Vella, empieza al pie del acantilado rocoso (número 2 foto 2 y 3) contiguo al del mirador “del roc de la Palomera” (número 1 foto 2 y 3) y transcurre en sentido de la vertiente hasta llegar a la zona de merenderos y emplazamiento de la infraestructura de captación de agua e hidrante artificial para la defensa y lucha contra incendios forestales (número 3, foto 2 y 3) que se encuentra al final de la pista forestal del “Maians”.

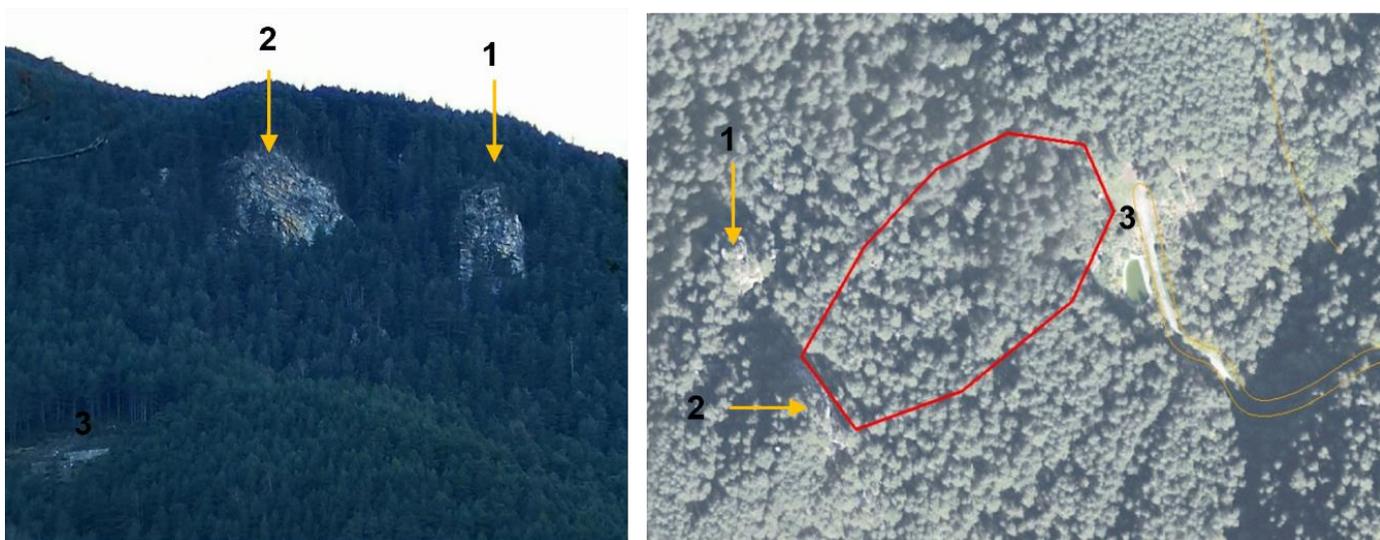


Foto 2 y 3: Localización detallada del rodal de estudio dentro del “bosc dels Maians”. Fuente: P.

Para la delimitación del emplazamiento y morfología del rodal de 1 ha, se ha utilizado el método “unidad riesgo-exposición” propuesto por la Oficina Nacional de Bosques de Francia (ONF, 2016) junto con un análisis de los pendientes y orientación de la vertiente; véase detalladamente en el apartado 3.

### 2.3 CARACTERÍSTICAS BIO-FÍSICAS DE LA ZONA

Los principales valores que caracterizan la fisiografía de la zona son:

	PENDIENT (°)	ALTITUD (m)	ORIENTACIÓN (°)
MÁXIMA	44	1621	49
MEDIA	32	1563	41
MÍNIMA	19	1525	27

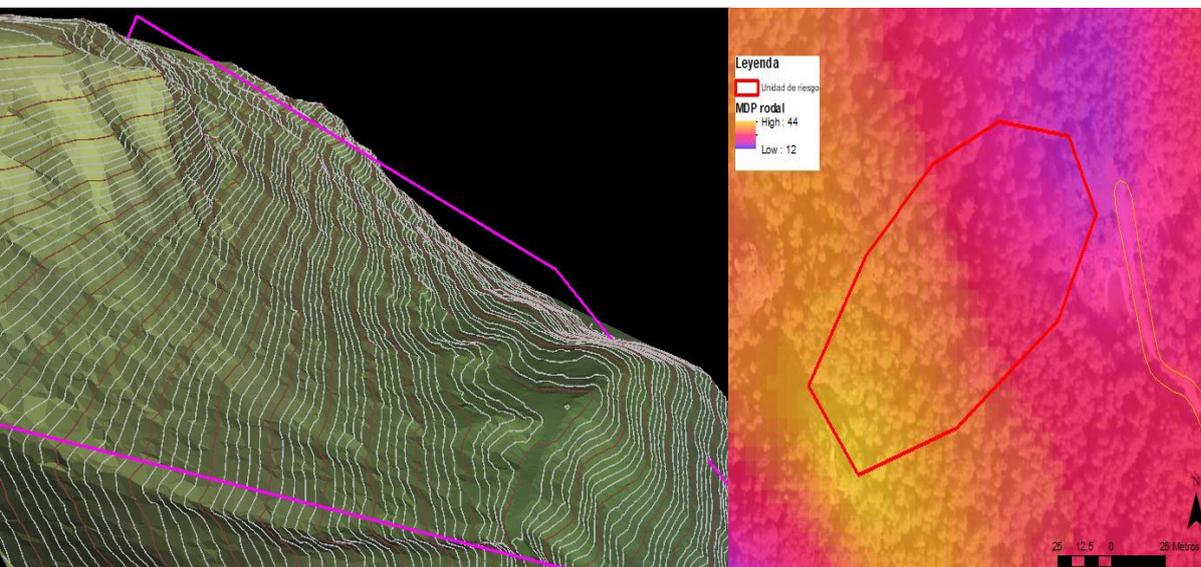


Figura 3: Mapa del relieve de la zona y de pendientes del rodal. Fuente: E. P.

La litología de la zona corresponde a una formación de margocalcareas y pizarras viroladas (formación Griotte de Manyanet) de la edad Devoniano inferior medio (Emsii-Eifeli). El afloramiento rocoso con estructura acantilada presenta una potencia de 50m de altura y una longitud de 40m. La erosión de la roca se debe fundamentalmente a la infiltración del agua que va disolviendo los carbonatos y mediante procesos de gel y fracción, fragmentando en bloques de distintas dimensiones.



Foto 4 y 5: Detalle del acantilado rocoso y de su fragmentación. Fuente: Propia.

Emplazado al pie del acantilado, aparece un bosque de pino albar (*Pinus sylvestris*) mesófilo estructurado sobre un estrato arbóreo monoespecífico, claro y desarrollado, acompañado por un estrato herbáceo de escaso recubrimiento en el que domina la *Festuca gauteri* y algunos musgos xerófilos, y un estrato arbustivo muy desarrollado recubriendo el 70% del sotobosque, dominado por el boj (*Buxus sempervirens*) y con menor presencia de *Lonicera* (*Lonicera sp.*)

La masa del rodal está formada por pino silvestre del ámbito pirenaico, de calidad de estación de media a alta; siendo de mayor calidad en las zonas de menor pendiente, de estructura semirregular y distribuida homogéneamente con una ligera tangencia de copas y una fracción de cabida cubierta de alrededor del 70%. Edad de los pies mayores (diámetro >40cm) próxima a los 70 años.

Las principales variables dasométricas estimadas para el rodal, mediante inventario dasocrático realizado en marzo de 2021 se resumen en la siguiente tabla:

Especie	Densidad media (p/ha)	Diámetro medio (cm)	AB (m <sup>2</sup> /ha)	Altura dom (m)
<u>Pinus sylvestris</u>	950	22	42.5	14

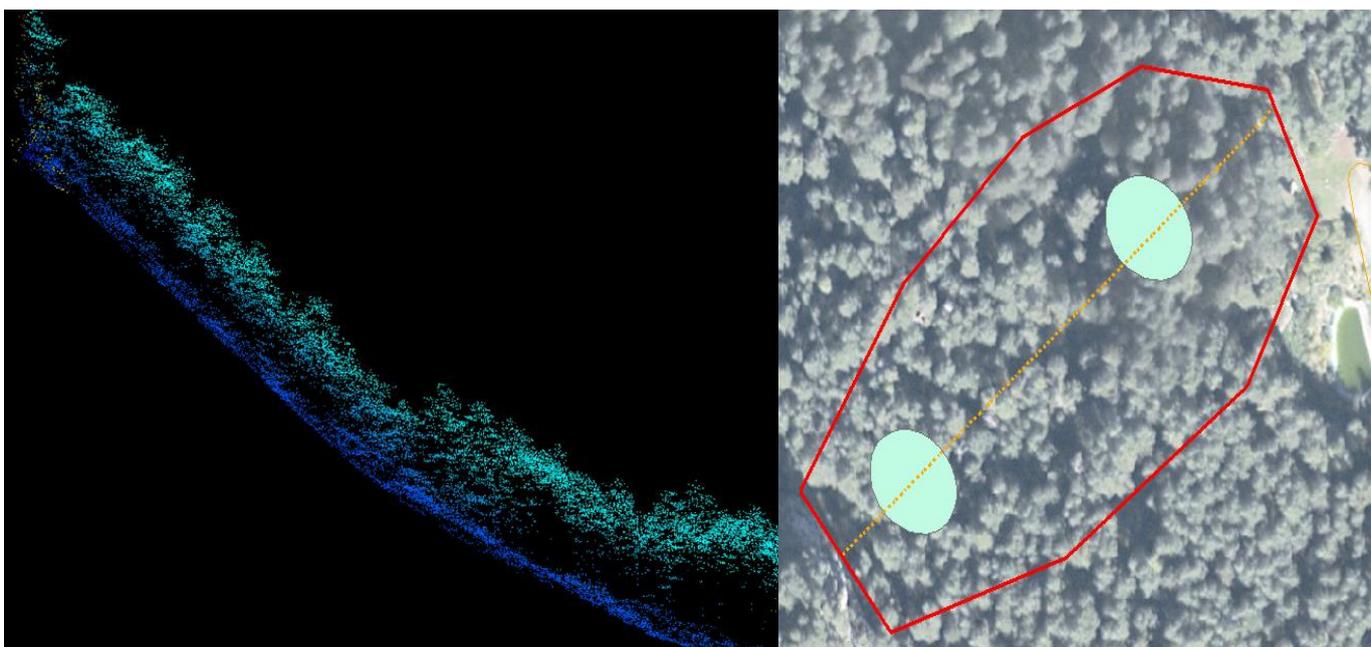


Figura 4: Perfil longitudinal de la estructura vertical de la masa forestal dentro del rodal; y localización de los inventarios forestales dentro del rodal. Fuente: elaboración propia con software FUGROView en base al vuelo LIDAR de Andorra del 2018 (Gobierno de Andorra)



Foto 6: Recubrimiento del boj y estructura arbolada del rodal. Toma de medidas de las variables dasométricas del rodal. Fuente: Propia.

*\*Los datos dasométricos de las parcelas inventariadas están disponibles en los anejos.*

### 3. CARACTERIZACIÓN DEL GRADO DE PROTECCIÓN DEL BOSQUE FRENTE A LA CAIDA DE ROCAS y BLOQUES

A priori, realizando una visita e inspección visual de la zona, parece que el bosque ejerce una función protectora frente a la disipación de rocas i bloques rocosos en movimiento, dado que se observan abundantes indicios de rocas fragmentadas sedimentadas a lo largo de la vertiente, así como ciertas heridas y evidencias de impactos de éstas contra algunos de los árboles presentes.

Hablamos de bosque protector fundamentalmente porque, al pie de la vertiente existe una zona de merenderos públicos junto a una balsa/depósito de captación de agua para dar soporte a la extinción de incendios forestales. Asimismo, cabe destacar que a lo largo del rodal transcurre un sendero muy concurrido que lleva hasta un mirador panorámico emplazado a los alrededores del acantilado.

En base a las evidencias visuales de movimiento de rocas, y la afluencia pública de la zona, se puede asumir que el bosque ejerce cierta función protectora.



Fotos 6, 7, 8 y 9: situación dentro de la zona de estudio y de sus alrededores.

Sin embargo, para cuantificar el grado de protección del bosque frente a la caída i disipación de bloques rocosos, se ha utilizado el método propuesto por la ONF en la “guía de gestión de bosques del Pirineo, protección contra los riesgos naturales” (ONF-2016). Siguiendo el procedimiento de análisis propuesto en primer lugar se identifica la “Unidad riesgo-vulnerabilidad”, que se caracteriza por ser la zona geográfica caracterizada por presentar un mismo grado de riesgo sobre los bienes y servicios expuestos al mismo.

### 3.1 ANÁLISIS DEL RIESGO DE CAÍDA DE ROCAS

Siguiendo la formulación clásica del riesgo, entendido como la ocurrencia e intensidad de un peligro por la vulnerabilidad de los valores expuestos al mismo, a continuación, se analiza ambas componentes:

En primer lugar, se procede a evaluar **el peligro de caída de bloques rocosos**, para esto se han identificado algunas evidencias físicas sobre la actividad reciente de movimiento de rocas, en la zona de salida i de tránsito.

Los principales signos observados que confirman la actividad son:

- Presencia de bloques inestables y fracturados en el despeñadero;
- Impactos en el suelo de rocas y bloques;
- Árboles con evidencias de impactos y heridas en la corteza a distintas alturas y siempre localizadas en la parte superior del tronco (vertiente arriba);
- Árboles tronchados;
- Rocas estacionadas en la base superior de un tronco o árbol.

Adicionalmente, se ha realizado un muestreo y análisis de los fragmentos rocosos localizados en los alrededores de la zona de salida, concluyendo que el volumen medio de las rocas movilizadas recientemente, no supera el metro cúbico.

Con todas estas evidencias y en base a las muestras de campo analizada, **se confirma que la inestabilidad del despeñadero y su capacidad para movilizar bloques rocosos.**

En segundo lugar, para la cuantificación de la vulnerabilidad de los valores socioeconómicos expuestos al peligro, se ha realizado una inspección de la zona y se ha identificado únicamente una red de senderos turísticos que conducen hacia un mirador a las cercanías del despeñadero, así como un área de reposo y merendero y un depósito de aguas al linde derecho de la zona de desaceleración del riesgo. Estas infraestructuras, por su naturaleza y por albergar temporal e intermitentemente pequeños grupos de personas, le corresponde una **vulnerabilidad baja**.

**La combinación de ambas variables (intensidad y vulnerabilidad) genera un riesgo estimado de caída de bloques de grado ligero.**

Finalmente, se ha delimitado la superficie equivalente a 1 ha ocupada por el bosque protector y en la que se realizarán las actuaciones de mitigación al riesgo de incendio forestal para salvaguardar el grado protector a la caída de rocas. Para ello, se ha utilizado el mapa de pendientes y orientaciones para generar un mapa de direcciones de fluido del terreno que permite identificar el principal eje de trayectoria dominante que seguirán la mayoría de los bloques y rocas en movimiento. Dado que una partícula en movimiento sobre una superficie rugosa tiende a desviarse, esto genera un ensanchamiento de la zona expuesta a su llegada, generando un área con forma de lagrima, similar a la que genera una colada. Basándonos en esto, se ha delimitado el área de la unidad riesgo-vulnerabilidad (véase Figura 5)

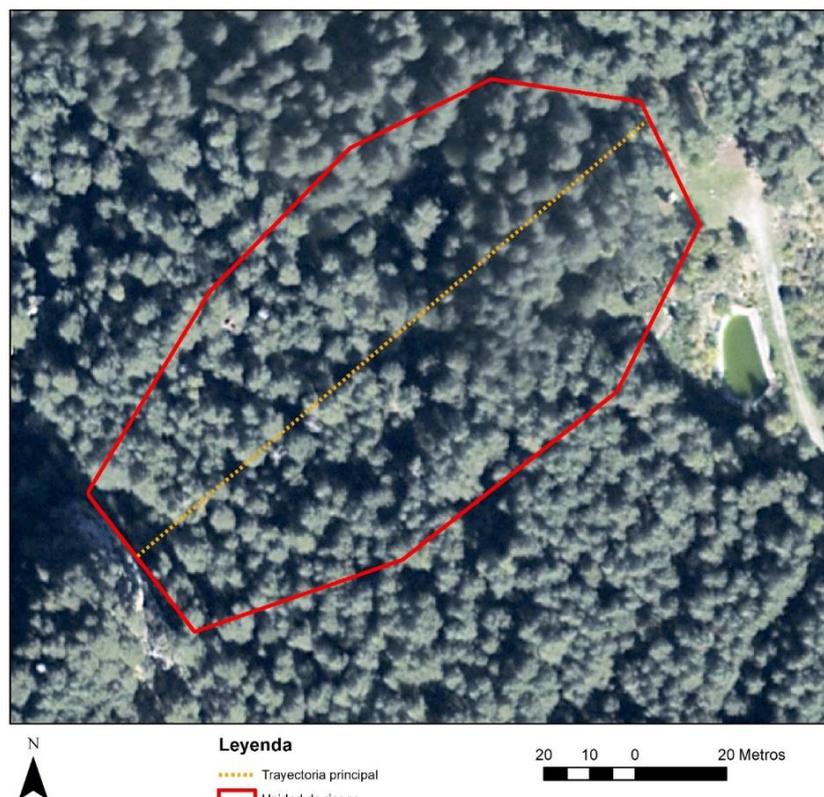


Figura 5: Mapa de delimitación de la unidad riesgo-vulnerabilidad del rodal de estudio.

### 3.2 ANÁLISIS DEL GRADO PROTECTOR ACTUAL DEL BOSQUE

Para evaluar el grado de protección de la vegetación frente a la movilización de bloques y rocas, se estima a continuación el Índice de Control del Peligro (IMA). El IMA toma en consideración los impactos posibles del cambio climático sobre la masa forestal, las características actuales de la masa, su resiliencia y su dinámica natural. Sin embargo, no incorpora los efectos o interacción de otras perturbaciones que pudieran ocasionar una alteración significativa sobre el funcionamiento de la masa como podrían ser las consecuencias de un incendio forestal.

Para la estimación del IMA, se ha realizado un inventario dasocrático del área de estudio con el fin de poder caracterizar las principales variables requeridas: Densidad, Diámetro, Área Basimétrica de la masa forestal con función protectora (se adjuntan los resultados de las parcelas de inventario en los anejos).

En base a los resultados del muestreo, y para bloques rocosos con volumetría inferior al metro cúbico, se obtienen las siguientes variables de interés para el cálculo del IMA:

- Longitud del bosque (proyección horizontal) inferior a 200m,
- Densidad arbórea >350,
- Diámetro dominante >17.5cm
- Área basimétrica >25 m<sup>2</sup>/ha.

Se obtiene un valor de IMA de 3, que se corresponde a una eficacia de protección media de la vegetación frente a la caída de rocas.

En paralelo, se ha realizado una simulación del peligro residual probable de caída de rocas (PRP) con el software “RockforNet – rapid rockfall forest assessment tool” ([www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org)). El PRP representa el porcentaje de rocas con capacidad de traspasar el efecto protector de bosque e impactar en cotas inferiores a este. Para conducir la simulación, se han medido todas las rocas sueltas localizadas dentro de la parcela de muestreo y que aparentemente se han movilizadas en los últimos 10-15 años, para poder caracterizar el tamaño medio, la forma y la masa de la roca media. Así pues, para una roca media de volumen 0.01m<sup>3</sup> i 33kg de masa, refleja que el bosque tiene una capacidad física actual de protección del 95% (los detalles i resultados de la simulación se recogen en los anejos)

### 3.3 ANÁLISIS DEL GRADO PROTECTOR FUTURO DEL BOSQUE

Otra consideración importante es conocer la evolución presumible del grado de protección en el tiempo (en los próximos 40 años), para poder planificar las actuaciones necesarias que orienten la masa a conservar y mejorar sus características frente a la caída de bloques.

En vistas a los valores dasométricos actuales de la masa (edad, estructura, AB, densidad, vitalidad), a la ecología de la especie dominante (*Pinus. sylvestris*) y dado que el rodal no está sujeto a ninguna intervención de gestión forestales ordinaria (clareos, cortas selectivas, etc.), se estima que el IMA en los próximos 40 años se mantenga en medio con tendencia a alto.

### 3.4 AMENAZAS DE LA MASA FORESTAL

Adicionalmente a la evolución del IMA, resulta importante estimar las amenazas del medio forestal que pueden comprometer la viabilidad futura del grado de protección. Esto es, estimar el equilibrio entre la fauna y la flora (tanto doméstica como silvestre), la resiliencia de la masa, impactos de la dinámica de la masa y el riesgo de incendios, factores todos ellos que pueden comprometer o modificar substancialmente la evolución de la masa en el tiempo y por consiguiente alterar su capacidad de protección frente las rocas.

- Equilibrio entre fauna y flora:  
Durante las visitas de campo se han identificado rastros de ungulados silvestres correspondiendo a corzo (*Capreolus capreolus*). Sin embargo, el índice de presencia es moderado dado que la vegetación de superficie es abundante y no se observan efectos de sobre pastoreo ni tampoco perturbaciones directas sobre el regenerado y/o pies menores como pudiera ser el ramoneo o el frotado de corteza. Esta situación requerirá una vigilancia y seguimiento para analizar como evoluciona la población local de corzo y sus efectos sobre la masa, con especial atención sobre el regenerado.

Por otro lado, en la zona no hay evidencias ni ningún registro de pastoralismo doméstico, por lo que no supone ninguna amenaza para el bosque.

- Resiliencia de la masa:  
Para determinar la resiliencia de la masa, se analizan aquellas componentes relacionadas con la vitalidad y estabilidad de la población como la edad, el estado fitosanitario, la composición, la estructura o el coeficiente de esbeltez.

A continuación, se resumen los valores para la determinación de la resiliencia de las dos parcelas inventariadas:

Parcela 1	Valor	Índice	Resiliencia
Edad dominante	60 < años	0	2,5
Decaimiento y mortalidad	< 10% pies	0	
Composición	>75% sp dominante	1	
Estructura	Semi regular	0.5	
Esbeltez	Ho/Dg > 65	1	

Parcela 2	Valor	Índice	Resiliencia
Edad dominante	60 < edad < 100 años	1	2,5
Decaimiento y mortalidad	< 10% pies	0	
Composición	>75% sp dominante	1	
Estructura	Semi regular	0.5	
Esbeltez	Ho/Dg < 65	0	

En general, la resiliencia de la masa presente dentro de la unidad riesgo-vulnerabilidad, es buena con una ligera tendencia a intermedia, debido a una ligera inestabilidad física de la esbeltez en el caso del bosque superior (zona de salida i tránsito) y debido a la edad en el caso del bosque emplazado al faldón de la vertiente.

- Evolución presumible de la masa:  
En los próximos 40 años, el bosque evolucionará hacia una masa madura con tendencia a la capitalización y con tangencia de copas moderada. No obstante, la actual ausencia de regenerado potencial suficiente (<800p/ha) que garantice la renovación de la masa a largo medio y plazo, hace pensar que la masa esta ya muy cerrada. A medida que vayan pereciendo los pies mayores, generando pequeños claros, se potenciará la aparición de brinzales y la estructura se irregularizará paulatinamente.

Con todo, se considera que el rodal forestal permanecerá estable durante los próximos 40 años.

- Riesgo de incendios: el riesgo de incendios se analiza detalladamente en el apartado "Caracterización de la vulnerabilidad a los incendios forestales"

## 4. CARACTERIZACIÓN DE LA VULNERABILIDAD A LOS INCENDIOS FORESTALES

Con el grado de protección y la resiliencia de la masa forestal, se procedió a evaluar su vulnerabilidad a los incendios de alta severidad.

La vulnerabilidad al fuego de un ecosistema viene determinada por la capacidad de resistencia y resiliencia de las diferentes especies que lo conforman y de su piroecología particular. Así mismo, la capacidad de resistencia de la vegetación al fuego es función directa del régimen natural de incendios característico de la región por lo que cualquier incendio con comportamiento extremo podrá afectar la viabilidad del ecosistema y sus funciones. Mientras los incendios de alta intensidad pueden colapsar la funcionalidad del ecosistema debido a la pérdida de la cobertura forestal, los incendios de baja intensidad pueden ofrecer beneficios en términos de vitalidad forestal y de reducción del riesgo de futuros grandes incendios mediante la regulación de la competencia arbórea por los recursos, la restauración de hábitats o el control de las cargas de combustible. La predicción de la mortalidad directa post incendio se evalúa en base a la severidad estimada del comportamiento del fuego. Cuando una masa, por la estructura interna y distribución del combustible, está expuesta a sufrir incendios de copas se puede asumir que la mortalidad será prácticamente absoluta, a excepción de aquellas especies con capacidad de rebrote. Basado en esta premisa, algunos autores proponen 34 tipologías forestales distintas para bosques de coníferas del Pirineo clasificadas en 3 clases cualitativas de vulnerabilidad (Piqué et. al., 2011).

<b>Vulnerabilidad alta</b>	Normalmente el fuego provoca mortalidades elevadas en esto tipos de estructuras, en que hay una gran continuidad vertical y horizontal del combustible superficial y aéreo. (5 tipologías distintas de estructuras)
<b>Vulnerabilidad moderada</b>	Estructuras similares a la anterior, pero con menor carga de combustible y menos interconecto, lo que no facilita la transferencia del fuego de superficie a las copas. (14 tipologías distintas)
<b>Vulnerabilidad baja</b>	En estas estructuras la mortalidad es baja, dado que hay una clara discontinuidad vertical y horizontal de los combustibles no permitiendo el fuego de copas sostenido, aunque puede generarse antorcheos puntualmente. (12 tipos de estructuras forestales)

Figura 6: Clases de vulnerabilidad al fuego de copas propuesta por Piqué et al.

Sin embargo, cuando el fuego no presenta comportamiento de copas, la dificultad radica en la estimación de la mortalidad potencial de la masa debido al incendio de superficie y sus efectos directos a corto y medio plazo sobre la fisiología del árbol. En general, se utilizan modelos de regresión logística para cuantificar la mortalidad basados en la probabilidad de daños significativos ocasionados por el fuego sobre el cambium y los meristemos aéreos, dada una determinada intensidad de llama. Actualmente, existen modelos de mortalidad basados en el diámetro, la altura de la

copa y el grosor de la corteza del árbol tipo, para distintas especies forestales (Fernandez, et al., 2008).

Con lo mencionado anteriormente, la vulnerabilidad al fuego de copas del bosque es moderada y se ajusta a la tipología B10. La tipología B10 se caracteriza por presentar una fracción de cabida cubierta (FCC) o recubrimiento del dosel forestal, de entre el 30 y el 70%, un recubrimiento del combustible de superficie superior al 70%, recubrimiento combustible de escalera de entre el 25 y el 70%, una distancia entre combustible de superficie y el aéreo  $> 3\text{m}$  y distancia entre el combustible de escalera y el aéreo  $< 5\text{m}$ . Transponiendo esta tipología a la clasificación de los modelos de combustible forestal propuestos por Rothermel, la estructura forestal se asemeja al modelo 7.



Foto 10: Distribución del combustible de superficie y de escalera dentro del rodal.

La estructura forestal actual, debida a su FCC, el recubrimiento del estrato arbustivo y su combustible de escalera no permite la transferencia activa y sostenida del fuego de superficie a copas, aunque puedan generarse antorcheos. El fuego mayoritariamente propagará por superficie, afectado las copas de forma pasiva. Sin embargo, cabe esperar ratios de mortalidad alta a corto-medio plazo debido al efecto de socarramiento del fuego sobre las copas, así como al impacto térmico en el cambium en la base del tronco.

Inputs: SURFACE, SCORCH, MORTALITY

Description

Fuel/Vegetation, Surface/Understory

Fuel Model

Fuel/Vegetation, Overstory

Canopy Height  m

Crown Ratio  fraction

Mortality Tree Species

D.B.H.  cm

Fuel Moisture

1-h Fuel Moisture  %

10-h Fuel Moisture  %

100-h Fuel Moisture  %

Live Herbaceous Fuel Moisture

Live Woody Fuel Moisture  %

Weather

Midflame Wind Speed (upslope)  km/h

Air Temperature  °C

Terrain

Slope Steepness  %

bosc de la comella

Head Fire

Tree D.B.H. cm	Surface Fire Rate of Spread m/min	Surface Flame Length m	Scorch Height m	Prob of Mortality %
10	15.5	2.1	14.3	100
20	15.5	2.1	14.3	100
30	15.5	2.1	14.3	100
40	15.5	2.1	14.3	99

Figura 7: Inputs para la simulación del comportamiento del fuego del rodal con el software BehavePlus 6, y resultados de la simulación (velocidad de propagación longitud y llama, altura de socarramiento y probabilidad de mortalidad del arbolado).

## 5. MEDIDAS DE MITIGACIÓN – SELVICULTURA PREVENTIVA

En los bosques protectores de bloques y rocas expuestos al riesgo de incendio, la planificación debe integrar la necesidad de dirigir y conservar la masa forestal hacia el estado de mayor desarrollo, con el fin de optimizar la función protectora, y al mismo tiempo, minimizar y mitigar la vulnerabilidad de esta a los incendios de alta severidad. Por otro lado, también debe considerarse que la zona con mayor vulnerabilidad a los impactos de los desprendimientos, zona de recepción al fondo de valle, corresponde estadísticamente a la zona con mayor ocurrencia de igniciones de incendios, debido en gran medida a las actividades antrópicas. Esta situación pone de manifiesto la necesidad de combinar una planificación ajustada a los requerimientos funcionales del bosque protector, pero también en las estructuras y masas emplazadas en los alrededores de las zonas habitadas y expuestas, muy especialmente en la interfaz urbano forestal, con el fin de promocionar estructuras que dificulten la propagación del fuego “urbano” hacia el bosque protector.

En este sentido, la presente experiencia se encuadra dentro del proyecto MONTCLIMA como una acción piloto para la mitigación de la vulnerabilidad a los incendios forestales de los bosques de protección de rocas y bloques con el fin de salvaguardar su funcionalidad.

### Actuaciones para minimizar la vulnerabilidad al fuego:

Con el fin de minimizar la vulnerabilidad del bosque a los fuegos de copas, se han implementado una serie de tratamientos silvícolas que permita transformar la tipología forestal B10 a una de tipo C6 (Piqué et al. 2011). Las tipologías C se caracterizan por presentar una discontinuidad vertical entre los estratos, situación que impide la transferencia entre los combustibles superficiales y de escalera con el dosel arbóreo.

- Para ello, en todo el ámbito del rodal de actuación (1ha), se ha realizado una poda generalizada sobre el estrato arbustivo hasta una altura de 90-100cm, seguido de un desbroce selectivo para reducir el recubrimiento del matorral por debajo del 70%, y finalmente un desbroce del combustible de escalera.
- El matorral directamente en contacto con el regenerado o pies de reducidas dimensiones (diámetro inferior a 20cm) se ha eliminado completamente, para crear una zona libre de combustible y minimizar el impacto térmico sobre los tejidos meristemáticos.
- Los pies de pino albar se han podado hasta 2-2,5m de altura, y puntualmente se han derribado, mediante clara por lo bajo, los pies moribundos y/o extremadamente dominados sin posibilidad de desarrollo futuro. Sin embargo, la FCC general se ha mantenido por encima del 60%, así como la AB no ha

disminuido de les 30m<sup>2</sup>/ha. Estos valores límite, por un lado, permitirá asegurar la continuidad de la función protectora, y por el otro, especialmente la FCC, limitará el rebrote del matorral heliófilo dado el efecto de regulación lumínica que ejerce el dosel sobre la superficie.

- Todos los restos generados se han troceado in situ en longitudes inferiores a 1m y se han distribuido homogéneamente por el rodal, y muy especialmente aprovechando las zonas de claros y aperturas del dosel. En el caso de los troncos de pies muertos, se han dejado en sus largos en el suelo en posición horizontal siguiendo la curva de nivel, para la mejora de la biodiversidad, especialmente hongos e invertebrados.

La consecución de una estructura forestal de tipo C6, dificulta la transferencia del fuego de superficie a las copas, dado que la estructura se caracteriza por presentar un recubrimiento del combustible de superficie inferior al 70% y del combustible de escalera del 25 al 70%, con una FCC del 30 al 70%, y con una distancia entre el combustible superficial y el aéreo superior a los 3m. En este caso, se puede asociar a una modelo de combustible de Rothermel de tipo 5.

A continuación, se recopilan algunas imágenes de las actuaciones preventivas realizadas:



Foto 11: Poda del estrato de matorral; parte izquierda se aprecia altura inicial del boj.



Foto 12: Estrato arbustivo después de la intervención



Foto 13 y 14: Eliminación del matorral en contacto con pies menores y con regenerado de

pino



Foto 15: Poda en altura de los pies y derribado de pies puertos



Foto 16: Estado restos vegetales dentro del rodal, a los 30 días de realizar la poda del matorral.

Con la realización de los tratamientos preventivos, se pretende disminuir la vulnerabilidad de la estructura a los incendios de alta intensidad y especialmente al comportamiento de fuego de copas.

Sin embargo, se ha realizado una simulación del comportamiento del fuego en base a las características finales del rodal (post tratamiento), para poder testear la hipótesis de partida.

La realización de una simulación del comportamiento del fuego; con software BehavePlus 6, genera unos resultados que apuntan en la misma dirección que lo expuesto anteriormente. En este sentido, los resultados de la simulación del escenario inicial muestran como a pesar de no generar-se fuegos activos de copas, la estructura, y sobre todo los combustibles de escalera, son capaces de propiciar la aparición de actividad de copas y antorcheo, que junto con la altura de socarramiento, suponen una probabilidad de mortalidad media del estrato arbóreo del 100%.

Situación distinta se observa en el escenario post tratamiento, suponiendo que los restos de los tratamientos ya se han mineralizado parcialmente y se asume un modelo de combustible superficial dominado por el matorral de baja a mediana altura (modelo 5). En estas condiciones, la actividad de copas desaparece, siendo el fuego mayoritariamente de superficie, y la altura de socarramiento disminuye drásticamente respecto escenario inicial; pasando de 14m a 2m, con lo que la mortalidad media estimada se sitúa alrededor del 58% de los pies.

Con los resultados a la vista, cabe esperar que los tratamientos han reducido notoriamente la vulnerabilidad del bosque protector a los incendios forestales de alta intensidad.

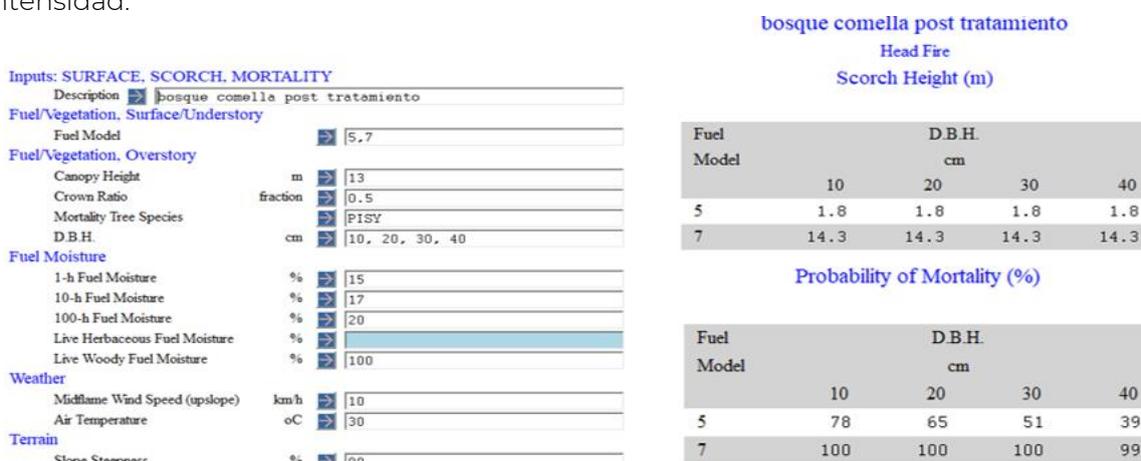


Figura 8: Inputs y salidas de la simulación del comportamiento del fuego pre y post tratamiento con el software BehavePlus 6.

### Actuaciones para conservar y mejorar la capacidad protectora del bosque:

Para conservar y mejorar el grado de protección del bosque al desprendimiento de ramas y bloques, se ha realizado clareos puntuales alrededor de los pies menores de pino, con el fin de promocionar su viabilidad y vitalidad futura.

Paralelamente, se ha desbrozado los alrededores de los pocos pies de frondosos presentes, para que estos vayan creciendo y ganando importancia relativa dentro de la masa, dado que estructuras mixtas resultan de gran interés para mejorar el grado de protección.

Finalmente, se ha conservado un estrato arbustivo bajo (de altura inferior a los 100cm) con el fin de asegurar su presencia y su papel en el detenimiento de rocas de pequeñas dimensiones. Al realizar la poda del matorral para generar una mayor discontinuidad vertical entre estratos, se favorece la capacidad protectora del estrato arbustivo, dado que este va a estimular el rebrote de tocones; especialmente significativo en el caso del boj, densificando el número de tallos y generando una mayor resistencia al paso de las rocas en movimiento.



Foto 17 y 18: Efecto protector de los tallos del boj en pequeñas rocas, y promoción de especies frondosas dentro del rodal.

## 6. REFERENCIAS

Christensen, J.H.; Kanikicharla, K.K.; Aldrian, E.; An, S.I.; Cavalcanti, I.; de Castro, M.; Dong, W.; Goswan, P.; Hall, A.; Kanyaga, J.K.; Kitoh, A.; Kossin, J.; Lau, N.C.; Renwick, J.; Stephenson, D.; Xie, S.P.; Zhou, T., 2013. Climate Phenomena and their Relevance for Future Regional Climate Change. Chapter 14. Working group I contribution to the IPCC fifth assessment report (AR5). Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge and New York.

Corona C., Lopez-Saez J., Favillier A., Mainieri R., Eckert N., Trappmann D., Stoffel M., Bourrier F., Berger F. 2017 Modeling rockfall frequency and bounce height from three-dimensional simulation process models and growth disturbances in submontane broadleaved trees. *Geomorphology*, 281, 66-77

Dorren, L.; Berger, F.; Imeson, A.; Maier, B.; Rey, F., 2004. Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps. *Forest Ecology and Management*. 195. 165-176. 10.1016/j.foreco.2004.02.057.

Fernandes P.M.; Vega, A.; Jiménez, E.; Rigolot, E., 2008. Fire resistance of European pines. *Forest Ecology and Management* 256 (2008) 246–255.

Jacob, D.; Petersen, J.; Eggert, B.; Alias, A.; Christensen, O.; Bower, L.; Braun, A.; Colette, A.; Déqué, M.M Georgievski, G.; et al. 2013. EURO-CODEX: new high-resolution climate change projections for European impact research, *Regional Environmental Change* 1-16.

Nakicenovic, N.; J. Alcamo; G. Davis; H.J.M. de Vries; J. Fenhann; S. Gaffin; K. Gregory; A. Grubler, T.Y. Jung, T. Kram, E.L. La Rovere, L. Michaelis, S. Mori, T. Morita, W. Papper, H. Pitcher, L. Price, K. Riahi, A. Roehrl, H-H. Rogner, A. Sankovski, M. Schlesinger, P. Shukla, S. Smith, R. Swart, S. van Rooijen, N. Victor, and Z. Dadi. N. Nakicenovic and R. Swart (Eds.), UK. pp 570. *Special Report on Emissions Scenarios*, IPCC, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 2000. pp. 570

Office national des forêts (ONF), 2016. Forêts Pyrénéennes à rôle de protection, guide de gestion. ONF, p94.

Piqué, M.; Beltrán, M.; Vericat, P.; Cervera, T.; Farriol, R.; Baiges, T. 2011b. Models de gestió per als boscos de pi roig (*Pinus sylvestris* L.): producció de fusta i prevenció d'incendis forestals. Sèrie: Orientacions de gestió forestal sostenible per a Catalunya (ORGEST). Centre de la Propietat Forestal. Departament d'Agricultura, Ramaderia, Pesca, Alimentació i Medi Natural. Generalitat de Catalunya

Plana, E., Font, M., Serra, M., Hörl, J., Hengst-Ehrhart, Y., Hartebrodt, C., Held, A., Clemenceau, A., Giroud, F., Tola, F., Capula, T., Cinus, S., Visani, C., Soi, F., Manca, G., Prat, N., Borràs, M., Vendrell, J., Ballart, H. and Vilalta, O. 2018. Forest risks in a climate change context: trends and risk management challenges of wildfires, floods, storms, avalanches and their interactions in EU landscapes. Networking for the European Forest Risk Facility Initiative (NET RISK WORK ECHO/SUB/2016/740171/PREV10 Project). CTFC Editions. 76pp

Scheidl, C., Heiser, M., Vospernik, S. *et al.* 2020. Assessing the protective role of alpine forests against rockfall at regional scale. *Eur J Forest Res* 139, 969–980.