

Títol del Treball:

Explorant la petjada dels incendis amb drons en els ecosistemes forestals

Nom estudiant: Paula Padilla Fernández

Correu electrònic: 102002paula@gmail.com

Grau en: Ciències Ambientals

Nom del tutor: Dr. Diego Varga Linde

Correu electrònic: diego.varga@udg.edu

Data de dipòsit de la memòria a través de la plataforma de TFG: 06/06/2024

AGRAÏMENTS

En primer lloc, vull agrair al meu tutor, Diego Varga, i a l'Elena Puigdemasa la seva ajuda al llarg d'aquest treball. M'han fet sentir com a casa i amb motivació per explorar el món de les SIG i els drons. Gràcies a ells, he gaudit d'elaborar aquest treball.

En segon lloc, vull agrair a la meva família el seu acompanyament incondicional al llarg de la carrera, pel seu suport en els bons i els mals moments. I sobretot, per compartir el meu interès per les ciències ambientals.

Finalment, vull agrair a tots els professors que m'han motivat a anar a classe dia rere dia, a descobrir coses noves i han fet d'aquests quatre anys una experiència que ha valgut la pena.

ÍNDEX

RESUMEN.....	5
ABSTRACT	6
REFLEXIÓ SOBRE ÈTICA	7
REFLEXIÓ SOBRE SOSTENIBILITAT.....	7
REFLEXIÓ SOBRE PERSPECTIVA DE GÈNERE.....	7
1. INTRODUCCIÓ	8
2. OBJECTIVES.....	10
3. METODOLOGIA.....	11
3.a. Àrea d'estudi	11
3.b. Captació d'imatges amb dron.....	11
3.c. Pre-tractament de les imatges.....	13
3.c.i. DJI Terra	13
3.c.ii. PIX4D.....	15
3.c.iii. QGIS 3.34.6	15
3.d. Càlcul dels índexs de vegetació	16
3.e. Efectes sobre l'ecosistema forestal	18
3.f. Obtenció d'imatges satèl·lit	19
4. RESULTATS.....	21
4.a. Índexs de vegetació	21
4.b. NDVI	21
4.c. Efectes sobre la vegetació	25
4.d. Comparativa amb imatges satèl·lit	27
5. DISCUSSIÓ	28
6. CONCLUSIONS.....	32
7. BIBLIOGRAFIA	33

RESUM

Els episodis d'incendis forestals són quelcom freqüent i que es produeix de manera natural al territori; si bé també poden ocórrer per causa antròpica. Amb l'avanç del canvi climàtic, s'espera un augment del seu risc, així com de la intensitat i extensió d'aquests episodis. En el cas de Catalunya, l'augment del risc d'incendi també és degut a l'aforestació, a causa de l'abandonament de la vida rural que es va produir cap als anys seixanta del segle passat.

Existeixen diferents tècniques per fer el reconeixement de les àrees cremades: al camp (*in situ*) o amb sistemes remots. Aquests sistemes remots es basen en l'obtenció d'imatges a partir de satèl·lits o vehicles aeris no tripulats (drons). L'ús dels drons ha augmentat darrerament i, en comparació amb els satèl·lits, presenta com a principal avantatge l'elevada resolució de les imatges.

Aquest treball explora l'ús de la teledetecció amb drons i càmeres multiespectrals com eines recents per a l'exploració de la vegetació i les àrees cremades. A partir de les dades recollides, s'han calculat diferents índexs de vegetació i models de superfície, que permeten fer una valoració de l'estat de la vegetació post-incendi.

Els resultats obtinguts mostren que dins el gran ventall d'índexs de vegetació, alguns són més adients que d'altres en funció de les característiques de l'àrea d'estudi. Els mapes d'índexs de vegetació mostren diferències en la coloració dins l'àrea de crema en comparar els escenaris previ i posterior al foc.

La resolució de les imatges de dron ha permès delimitar cada una de les capçades i estudiar el valor de dNDVI arbre per arbre. Tot i que les cremes realitzades pels bombers solament cremen l'estrat herbaci i arbustiu, s'ha vist que les capçades dins l'àrea de crema s'han vist en part afectades pel foc.

Finalment, la comparativa d'imatges satèl·lit amb les imatges de dron mostren que les primeres tenen menys resolució espacial que les segones i, per tant, de menys utilitat en estudis on es requereixi precisió.

RESUMEN

Los episodios de incendios forestales son algo frecuente y que se produce de forma natural en el territorio; si bien también pueden ocurrir por causa antrópica. Con el avance del cambio climático, se espera un aumento de su riesgo, así como de la intensidad y extensión de estos episodios. En el caso de Cataluña, el aumento del riesgo de incendio también se debe a la aforestación, debido al abandono de la vida rural que se produjo hacia los años sesenta del siglo pasado.

Existen diferentes técnicas para realizar el reconocimiento de las áreas quemadas: en el campo (*in situ*) o con sistemas remotos. Estos sistemas remotos se basan en la obtención de imágenes a partir de satélites o vehículos aéreos no tripulados (drones). El uso de los drones ha aumentado últimamente y, en comparación con los satélites, presenta como principal ventaja la elevada resolución de las imágenes.

Este trabajo explora el uso de la teledetección con drones y cámaras multispectrales como herramientas recientes para la exploración de la vegetación y las áreas quemadas. A partir de los datos recogidos, se han calculado diferentes índices de vegetación y modelos de superficie, que permiten realizar una valoración del estado de la vegetación post-incendio.

Los resultados obtenidos muestran que en el gran abanico de índices de vegetación, algunos son más adecuados que otros en función de las características del área de estudio. Los mapas de índices de vegetación muestran diferencias en la coloración en el área de crema al comparar los escenarios previo y posterior al fuego.

La resolución de las imágenes de dron ha permitido delimitar cada una de las copas y estudiar el valor de NDVI árbol por árbol. Aunque las cremas realizadas por los bomberos solo arden el estrato herbáceo y arbustivo, se ha visto que las copas dentro del área de quema se han visto en parte afectadas por el fuego.

Por último, la comparativa de imágenes satélite con las imágenes de dron muestran que las primeras tienen menos resolución espacial que las segundas y, por tanto, de menor utilidad en estudios donde se requiera precisión.

ABSTRACT

Forest fires episodes are something frequent and occur naturally in the territory; although they can also occur due to anthropogenic causes. With the advance of climate change, an increase in its risk is expected, as well as in the intensity and extent of these episodes. In the case of Catalonia, the increase in the risk of fire is also due to afforestation, due to the abandonment of rural life that occurred around the sixties of the last century.

There are different techniques for recognizing burnt areas: in the field (on site) or with remote systems. These remote systems are based on obtaining images from satellites or unmanned aerial vehicles (drones). The use of drones has increased recently and, compared to satellites, the main advantage is the high resolution of the images.

This work explores the use of remote sensing with drones and multispectral cameras as recent tools for the exploration of vegetation and burned areas. Based on the data collected, different vegetation indices and surface models have been calculated, which allow an assessment of the state of the post-fire vegetation.

The results obtained show that within the wide range of vegetation indices, some are more suitable than others depending on the characteristics of the study area. The vegetation index maps show differences in coloration within the burn area when comparing the scenarios before and after the fire.

The resolution of the drone images has made it possible to delimit each of the peaks and study the dNDVI value tree by tree. Although the burns carried out by the firefighters only burn the herbaceous and shrub layer, it has been seen that the tops within the burning area have been partly affected by the fire.

Finally, the comparison of satellite images with drone images shows that the former have less spatial resolution than the latter and, therefore, less useful in studies where precision is required.

REFLEXIÓ SOBRE ÈTICA

La crema controlada de vegetació per a estudiar l'impacte dels incendis sobre la regeneració de l'ecosistema pot semblar una mesura molt destructiva per a l'obtenció de coneixement. Però hi ha més objectius al darrere, com ara l'eliminació de combustible i evitar incendis futurs de majors dimensions i menys fàcils d'apagar. Aquestes cremes tenen dimensions reduïdes i es realitzen de forma controlada per equips de bombers. És, per tant, una mesura preventiva que, des de la ciència, podem aprofitar per entendre com la intensitat dels incendis té efectes sobre la regeneració de l'ecosistema. Aquest estudi s'ha elaborat a partir de les dades recollides amb ús de drons i càmeres multiespectrals. Les zones on s'ha volat el dron es troben dins d'espais naturals protegits; per tant, s'han demanat els permisos adients als serveis territorials de la Generalitat de Catalunya i s'han respectat totes les recomanacions sobre l'avifauna.

REFLEXIÓ SOBRE SOSTENIBILITAT

L'estudi de la dinàmica dels incendis i del rastre que deixen al seu pas, així com dels efectes de la seva intensitat sobre la vegetació i el sòl, permet establir mesures de gestió per a la conservació dels espais naturals en risc d'incendi. Davant d'un escenari futur amb incendis de majors dimensions i severitats, els treballs que estudien aquesta dinàmica permeten obtenir eines per a la conservació d'aquests entorns. Entorns que suposen una font de recursos i serveis ecosistèmics de gran valor per a la humanitat i el medi ambient.

REFLEXIÓ SOBRE PERSPECTIVA DE GÈNERE

Les tecnologies han estat tradicionalment lligades a l'estereotip masculí i han sofert un biaix cap als homes. De manera similar, les ciències han estat tradicionalment fetes per homes i la major part dels descobriments i aportacions s'atribueix al sector masculí. Les tecnologies de Sistemes d'Informació Geogràfica, utilitzades en aquest treball, són una eina tecnològica molt sovint utilitzada en les ciències ambientals i, per tant, pot ser subjecte d'aquest biaix que prové tant de la tecnologia com de la ciència. Cal reconèixer que, any rere any, s'avança per a un accés igualitari a les ciències i les tecnologies i es lluita per al reconeixement de la contribució de les dones en aquests àmbits.

1. INTRODUCCIÓ

Els incendis són episodis que es produeixen de manera natural arreu del planeta, tot i que la causa principal és l'activitat antròpica. En el clima mediterrani són molt habituals, especialment en els mesos d'estiu, més secs. Això és observable fins i tot en les adaptacions de la vegetació mediterrània al foc; per exemple el recobriment de suro del *Quercus ilex*, que actua com a aïllant tèrmic i evita que els teixits vitals de l'arbre es vegin afectats (Bradshaw et al., 2011; Ne'eman et al., 2012). El règim d'incendis ve determinat pel clima, la vegetació dominant, l'estructura forestal i la topografia, segons Kane et al. (2013).

Diversos estudis basats en models predictius i en registres històrics conclouen que els efectes del canvi climàtic no provocaran un augment del nombre d'incendis en relació amb la tendència observada fins al dia d'avui, però sí la seva extensió i intensitat. També s'espera un augment del risc d'incendi, a causa de la sequedat de la vegetació i l'estrès hídric. Cada cop hi ha més incendis de majors dimensions, i menys de menor mida i intensitat (Bowman et al., 2011; Dupuy et al., 2020; Lloret & Marí, 2001; van Mantgem et al., 2013; Wasserman & Mueller, 2023).

En el context de Catalunya s'observa un canvi en la tendència del règim d'incendis forestals. Aquesta nova tendència no va lligada al canvi climàtic, sinó al canvi socioeconòmic i l'abandonament de la vida rural que es va produir al voltant del 1970. Diversos estudis mostren com l'abandonament del camp als anys setanta, l'augment de l'extensió de les àrees forestals (conegut com a aforestació) i la pèrdua de l'heterogeneïtat del paisatge ha resultat en un augment del risc i la gravetat de l'incendi. L'aforestació es tradueix en un major volum de combustible i l'homogeneïtat del paisatge en l'augment de la continuïtat d'aquest. Això resulta un major risc d'incendi i més dificultat a l'hora d'apagar-los o prevenir-los (Cervera et al., 2019; Chergui et al., 2018; Pausas & Fernández-Muñoz, 2012; *Per què Catalunya crema*, s.d.; Ursino & Romano, 2014; Viedma et al., 2006).

Els escenaris futurs mostren un augment de la intensitat i extensió dels incendis; però segons estudis com el de Aquilué et al. (2020), aquests es podrien controlar o disminuir si s'adoptés altre cop un paisatge de mosaic, augmentant les àrees rurals. Davant d'aquesta situació, en la que són més freqüents els grans incendis forestals, cal trobar eines de gestió de les àrees cremades per poder recuperar els ecosistemes afectats i fer-ne una gestió conscient a curt i llarg termini (Francos et al., 2018; Vallejo & Alloza, 2012).

Des del cos de Bombers de la Generalitat de Catalunya es fan cremes controlades arreu del territori català, per part del Grup de Recolzament d'Actuacions Forestals (GRAF). Aquestes cremes tenen diversos objectius, entre ells la reducció del combustible inflamable (mesura preventiva), la formació/entrenament del personal del cos (mesura formativa) i ampliar el coneixement sobre el foc (mesura de recerca). Aquesta recerca cobreix molts àmbits diferents, des de l'estudi dels ecosistemes fins a el reconeixement de patrons de severitat de l'incendi (*Programa de cremes prescrites*, s.d.).

La utilitat d'entendre la dinàmica del foc recau en el fet que l'estructura forestal posterior al foc influeix en l'establiment de noves espècies de plantes, la composició de la comunitat i la seva estructura, o fins i tot l'abundància de vertebrats (Donato et al., 2009; Roberts et al., 2008; Turner et al., 1997). Per tal d'elaborar propostes de mesures de gestió, s'utilitzen recursos com els inventaris fets al camp un cop extingit l'incendi, balanços de biomassa i identificació d'illes de vegetació intacta. Darrerament, amb la millora de les tecnologies, ha augmentat l'ús de drons i satèl·lits per a fer l'exploració de les àrees cremades (Assmann et al., 2019).

Per tal d'estudiar els efectes del foc sobre la vegetació, cal comparar l'estat d'aquesta abans i després de l'incendi. Un dels avantatges que presenta fer aquests tipus d'estudis a partir d'imatges satèl·lit és que aconseguir dades d'abans i després de l'incendi resulta molt senzill, ja que es capten imatges constantment arreu del planeta (Taula 1). Aquestes dades es poden descarregar en línia a les pàgines web dels diferents satèl·lits (*Explore Copernicus Satellite Missions*, s.d.). Com a desavantatge està la seva baixa resolució, insuficient quan l'àrea d'estudi és molt petita. Per exemple, la resolució del satèl·lit europeu SENTINEL és d'entre 20 i 10 m per píxel i la del satèl·lit americà LANSAT de 30 m per píxel (*Data | Landsat Science*, 2021; *Explore Copernicus Satellite Missions*, s.d.).

En canvi, l'ús de drons o vehicles aeris no tripulats (en anglès unmanned aerial vehicle, sigles UAV) permet obtenir imatges amb resolucions de fins a 1 cm per píxel; amb l'inconvenient que solament permet el reconeixement d'àrees reduïdes. Donat que és impossible predir quan i on es produirà un incendi, es fa difícil aconseguir imatges de dron pre-incendi.

Al marge de la tipologia de tecnologia de teledetecció utilitzada (satèl·lits o drons), els estudis de vegetació d'àrees cremades es basen en el càlcul dels anomenats índexs de vegetació. Diversos estudis, com els de Escuin et al (2008) i Fassnacht et al (2021), han explorat els diferents índexs existents, tots ells calculables a partir de les dades obtingudes de forma remota. Aquests mateixos treballs també exploren com alguns

factors (ombres, angle solar, cúmul de cendra) alteren els resultats dels diferents índexs i les possibles mesures de correcció.

Taula 1: Comparativa dels avantatges i inconvenients d'utilitzar drons (UAV) i satèl·lits		
Dron	AVANTATGES	Altament personalitzable segons les necessitats de la recerca. Elevada resolució temporal i espacial (≥ 1 cm/px) Possibilitat d'obtenir imatges laterals i zenitals
	INCONVENIENTS	Limitat pel temps climatològic (núvols, vent, pluja) Inversió en aparells i formació Sotmès a normatives i regulacions Zones prohibides o regulades
Satèl·lit	AVANTATGES	Monitoreig continu Cobertura mundial Descàrrega d'imatges senzilla Gran varietat de sensors
	INCONVENIENTS	Limitat per les condicions climàtiques i cobertes de núvols Resolució espacial limitada (o amb cost econòmic afegit) (10-30 m/px) Cal adaptar el mostreig a la disponibilitat de les imatges

2. OBJECTIVES

This study aims to test the use of drones to explore burned forest areas, to assess the type of results it offers and the methodological complexity. In order to achieve the main objective, other more specific objectives are proposed, which are:

- To calculate different vegetation indices from the reflectance images obtained with the drone, for the scenarios before and after the fire. Make a comparison of the different indices at a superficial level.
- To analyze the variation of the ràster histograms for the scenarios before and after the fire.
- To broadly compare satellite images with those obtained by drone

The hypothesis is that following the destructive effects of the fire, there will be changes in the forest structure, in terms of the cobertura of vegetation and exposed bare soil. It is expected that the vegetal extension will be reduced, while the area of bare soil will increase. It is also expected to observe these effects in the values of the vegetation indices, visible in the color change of the images and histogram distribution.

3. METODOLOGIA

3.a. Àrea d'estudi

L'àrea d'estudi d'aquest treball se situa al nord de Torroella de Montgrí, municipi de la comarca del Baix Empordà, dins la província de Girona. Concretament, es troba dins de l'entorn conegut com la Muntanya Gran, dins el Parc Natural del Montgrí, les Illes Medes i el Baix Ter (Figura 1).

Té una extensió de 0,52 ha i es troba dins d'un conjunt de parcel·les (amb una extensió total de 5,1 ha) on es realitzen cremes controlades i altres tractaments de gestió forestal per part dels GRAF. L'objectiu d'aquesta gestió és reduir el volum de combustible inflamable dins el Parc Natural. Els tractaments són diferents entre parcel·les. L'estudiada en aquest treball rep un tractament de cremes recurrents; s'hi han fet un total de 8 cremes al llarg dels anys 2011-2024. La darrera es va fer el 14 de febrer del 2024.

Es tracta d'una zona de clima mediterrani, amb estius secs, hiverns càlids i tardors plujoses. L'estructura vegetal consta d'un estrat arbori dominat pel pi blanc (*Pinus halepensis*); l'estrat arbustiu consisteix majoritàriament de garric (*Quercus coccifera*), alzina (*Quercus ilex*) i llentiscle (*Pistacia lentiscus*); finalment, l'estrat herbaci queda representat en gran part pel llistó (*Brachypodium retusum*). El subsol és de roques calcàries detrítiques i bioclàstiques del mesozoic (unitat geològica CKc) (*Mapa geològic de Catalunya*, s.d.). La zona està catalogada com hàbitat CORINE 32.143 "Màquies o garrigues amb pins blancs (*Pinus halepensis*), esparsos" segons el GEOVEG.

Dins l'àrea d'estudi hi passa un camí de terra, hi ha espais rocosos i una bassa.

3.b. Captació d'imatges amb dron

La captació de les imatges s'ha fet utilitzant un dron de la marca DJI model Matrice 300 RTK. S'hi ha acoblat una càmera òptica, també de la marca DJI, model ZENMUSE P1; i una càmera multiespectral de la marca AgEagle model Micasense ALTUM-PT (Figura 2). La primera capta imatges RGB i, al ser de la mateixa marca que el dron, es poden controlar i programar els dos a la vegada des del mateix programari. La segona, en canvi, enregistra imatges de les bandes vermella, verda, blava, propera a l'infraroig i pancromàtica (Figura 3); al ser d'una marca diferent, s'ha de configurar i controlar des d'un altre programari. Presenten una mida de píxel de 4,4 µm/px i 1,24 cm/px, respectivament; molt major a la de 10 – 30 m/px que ofereixen els satèl·lits.

El vol previ a la crema s'ha realitzat el 16 de febrer del 2023 i el posterior el 14 de març del 2024.

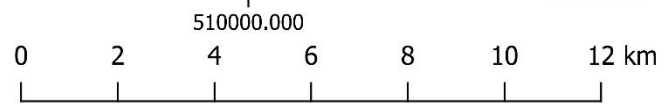
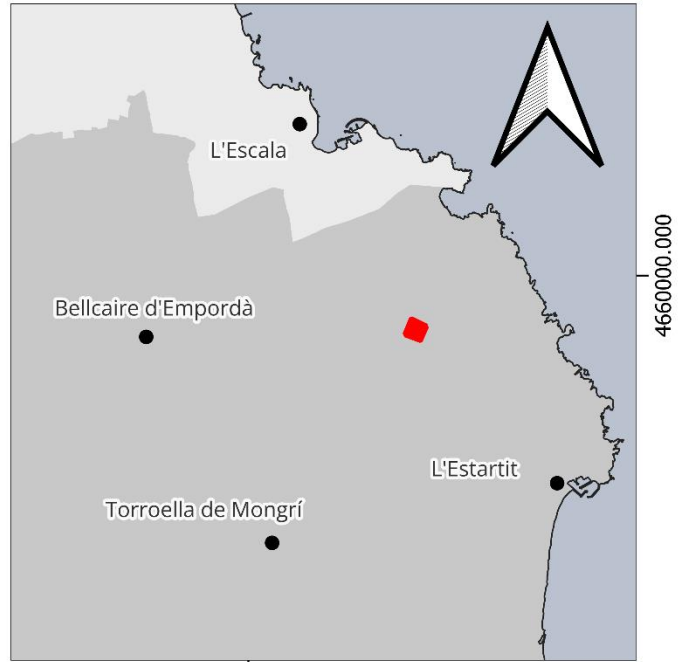
A) Context general



■ Àrea d'estudi □ Europa i Àfrica
 □ Catalunya

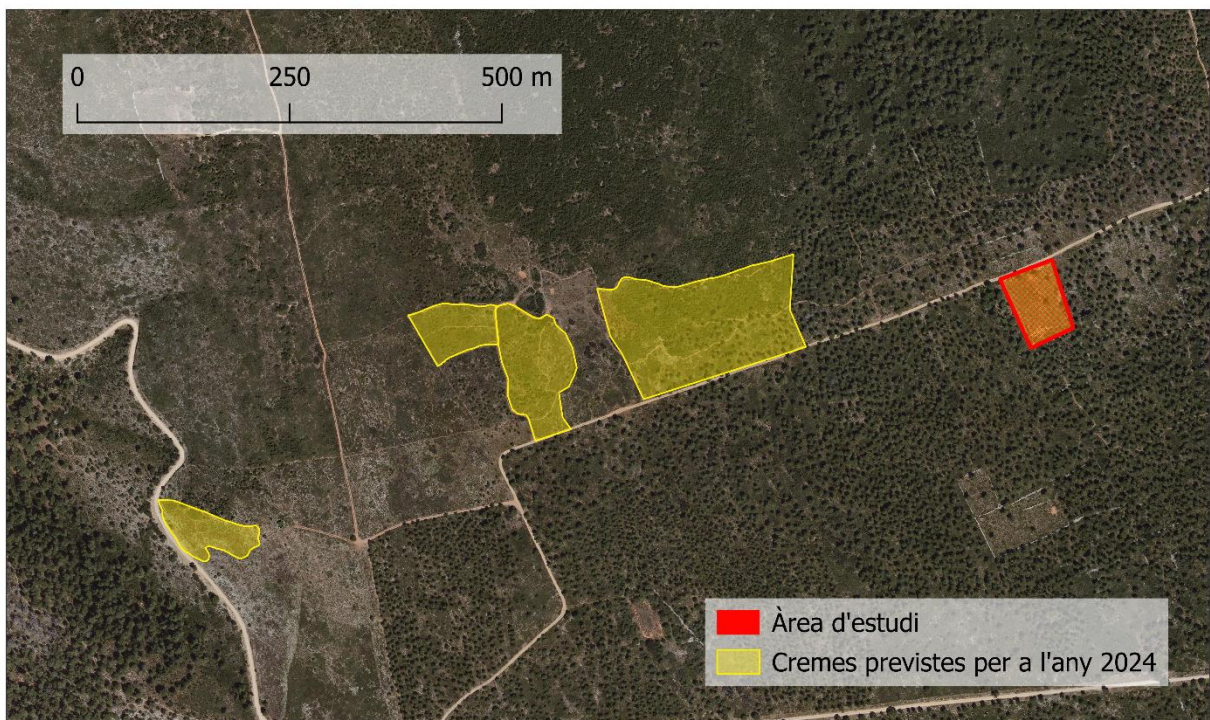
EPSG 25831
 Mapes generats a partir de dades de l'institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya (ICGC)

B) Regió d'estudi



■ Àrea d'estudi □ Baix Empordà
 ● Ciutats □ Catalunya

C) Àrea d'estudi



■ Àrea d'estudi
 ■ Cremes previstes per a l'any 2024

Figura 1. Cartografia de la situació general (A) i regional (B) de l'àrea d'estudi; així com la seva posició relativa dins el conjunt de cremes controlades realitzades pels bombers. Dades: ICGC - Vissir3, s.d.

La preparació del vol s'ha fet amb el programa DJI Pilot 2. Aquest permet la creació de rutes de vol des de zero (tot i que també ofereix l'opció d'importar una ruta ja creada en format KMZ). Per a la creació de la ruta des de zero s'ha seleccionat l'àrea d'estudi, l'altitud i velocitat de vol, el percentatge de superposició de les imatges, entre altres factors (Figura 4).

Un cop dissenyada la ruta, el programa mostra dades relatives a la duració del vol, el nombre d'imatges que s'obtidran i la distància recorreguda pel dron. Al camp, s'ha transferit la planificació del vol al dron i s'ha procedit a iniciar-la. Un cop finalitzat l'enregistrament de les imatges, aquestes s'han traslladat a un ordinador per a fer-ne el pre-tractament.



Figura 2. DJI Matrice 300 RTK, ZENMUSE P1 i Micasense ALTUM-PT (respectivament).
Font: (Altum-PT, s.d.; DJI Enterprise, s.d.)

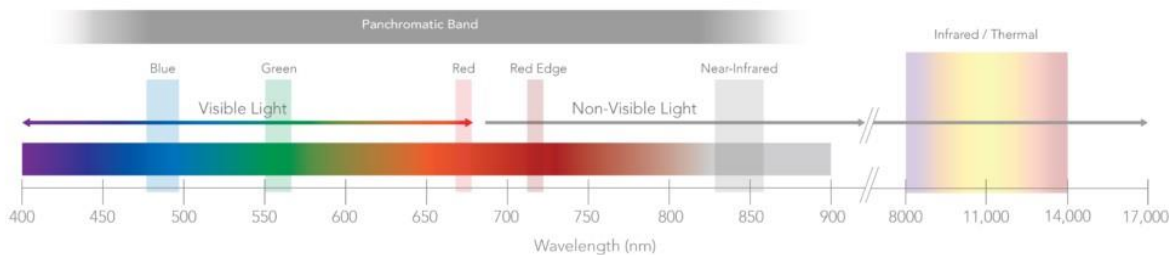


Figura 3. Representació de l'espectre electromagnètic. Font: (Cámaras multiespectrales | HIBA Formación, s.d.)

3.c. Pre-tractament de les imatges

S'ha sotmès les imatges a una fase de pre-tractament per tal de poder utilitzar-les per als càlculs posteriors. S'ha utilitzat els programaris DJI Terra (per a la generació de les ortofotos) i PIX4D (per al tractament de les dades lidar, la generació del model de superfícies (MDS), el model d'elevació (MDT) i corregir les imatges multiespectrales).

3.c.i. DJI Terra

DJI Terra és un programa desenvolupat per la marca DJI, la mateixa que produeix el dron i la càmera òptica. Això té alguns avantatges, per exemple, que el programari reconeix automàticament el dron i la càmera utilitzats; d'aquesta manera, fa el procés de calibració molt més àgil. El programa permet unir totes les imatges captades pel



Figura 4. Quadre de treball del programa DJI Pilot 2. S’hi observa l’àrea d’estudi (en blau), la ruta de vol (en verd) i algunes de les possibles opcions de configuració i dades de vol. (Aquesta és una imatge d’exemple, no correspon a l’àrea d’estudi d’aquest treball).

dron en una de sola, generant una ortofoto de tota l’àrea d’estudi (Figura 5). També se’n pot obtenir un núvol de punts (amb alçades) exportable en format LAS (lidar) que és la base per a generar un model de superfícies i un model d’elevacions.

La configuració del programa és senzilla, com s’ha comentat anteriorment, aquest mateix reconeix el dron i la càmera. Però cal configurar manualment factors com el



Figura 5. Quadre de treball del software DJI Terra. Cada punt gris representa una de les imatges captades pel dron que, en comunicar-se amb un GPS d’elevada precisió, permet obtenir les coordenades en que s’ha captat cada una de les imatges. (Aquesta és una imatge d’exemple, no correspon a l’àrea d’estudi d’aquest treball).

sistema de coordenades i el geoide; és a dir, cal indicar el tipus de projecció geogràfica s'utilitza, que en el cas de Catalunya és el sistema de coordenades ETRS89 / UTM zone 31N i model de geoide EGM 2008. Aquest pas en el pre-tractament de les imatges és de vital importància, ja que si no es fa, els arxius generats no es podran combinar adequadament per poder donar resultats fiables.

3.c.ii. PIX4D

PIX4D és un programa de fotogrametria que no està relacionat amb l'empresa DJI, de manera que no reconeix ni el dron ni la càmera i requereix més intervenció per part de l'usuari. De la mateixa manera que en el programa anterior, caldrà indicar el sistema de coordenades i el model de geoide a utilitzar. També cal indicar la càmera utilitzada, per tal de poder aplicar les correccions adequades segons el tipus de lent. PIX4D ofereix diferents opcions de processament, segons si els vol realitzar un tractament senzill i ràpid o més avançat. S'ha escollit el processament *Ag multispectral*, que genera les imatges de reflectància i els models de superfície (DSM) i elevació (DTM).

La reflectància és la fracció de llum incident que no absorbeix la superfície de l'objecte i retorna al sensor. Les dades de reflectància s'emmagatzemen com a nombres digitals relatius, de manera que, abans de fer qualsevol càlcul, cal convertir-los a nombres absoluts (Assmann et al., 2019).

Per generar imatges de reflectància amb les que poder treballar cal fer una calibració. Al camp, prèviament a iniciar el vol, es captura una foto de les nomenades dianes (superfícies amb una reflectància coneguda). És important que cap objecte les tapi o faci ombra. Aquestes dianes permeten establir una relació lineal entre els valors digitals relatius i la reflectància de les superfícies sota les condicions atmosfèriques del moment del vol. Posteriorment, PIX4D detecta automàticament les dianes en les imatges i realitza el calibratge (Figura 6).

La càmera multispectral utilitzada capta imatges per les cinc bandes (vermella, verda, blava, infraroja i NIR) cada vegada que fa una fotografia, de manera que fer una foto de la diana és suficient per poder calibrar posteriorment cada una de les bandes de reflectància.

3.c.iii. QGIS 3.34.6

S'ha utilitzat el programa gratuït QGIS 3.34.6 per a la resta del pre-tractament (modificar la resolució de les imatges multispectrals i georeferenciar-les) i l'obtenció de resultats (càlcul d'índexs de vegetació i generació de mapes). El vol pre-crema va captar imatges

amb una resolució de 5 cm/px i el post-crema amb una resolució de 3,5 cm/px. S'ha utilitzat l'eina *resampling* del complement SAGA per a igualar-los a 3,5 cm/px. Seguidament, s'ha georeferenciat cada un dels ràsters amb l'eina *georeferenciar*, seleccionant fins a 22 punts de referència (Figura 7). Finalment, s'ha assegurat que els píxels dels diferents arxius ràster coincideixin en superposar-los utilitzant el complement *alinejar ràster*.

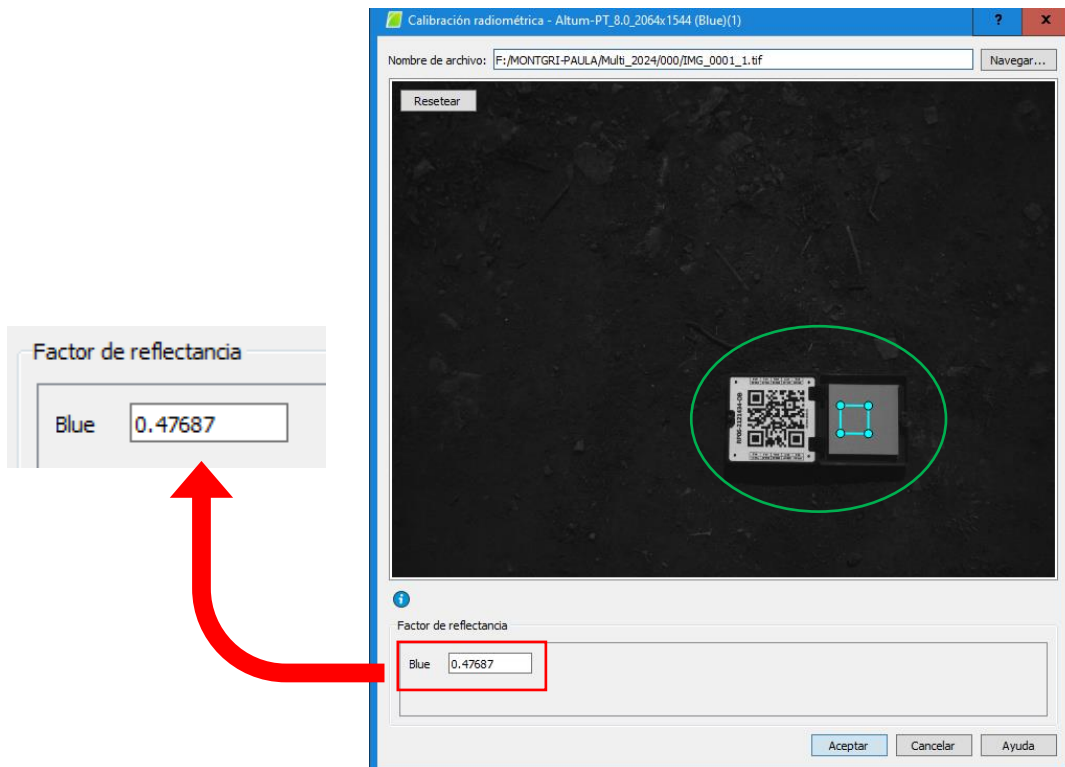


Figura 6. Quadre de treball del programa PIX4D. S'hi observa una de les dianes, detectada automàticament pel programa (cercle verd). A baix (rectangle vermell), queda indicat per defecte el valor de reflectància a assignar, en aquest cas, per a la banda blava.

3.d. Càlcul dels índexs de vegetació

Per tal d'avaluar l'efecte de les cremes sobre la vegetació, s'ha calculat diferents índexs basats en les bandes de reflectància vermella, blava, verda i propera a l'infraroig. Aquests índexs són sensibles a l'estat de la vegetació. El càlcul s'ha fet utilitzant l'eina *calculadora ràster* dins el programari QGIS.

Diferents estudis proposen l'índex NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) com el més senzill de calcular. Es tracta d'un índex sensible a la densitat de clorofil·la i, per tant, es converteix en un bon indicador de l'estat de la vegetació (Petropoulos & Kalaitzidis, 2012). A la vegada, cal tenir en compte que és considerablement sensible al sòl exposat i les condicions atmosfèriques.

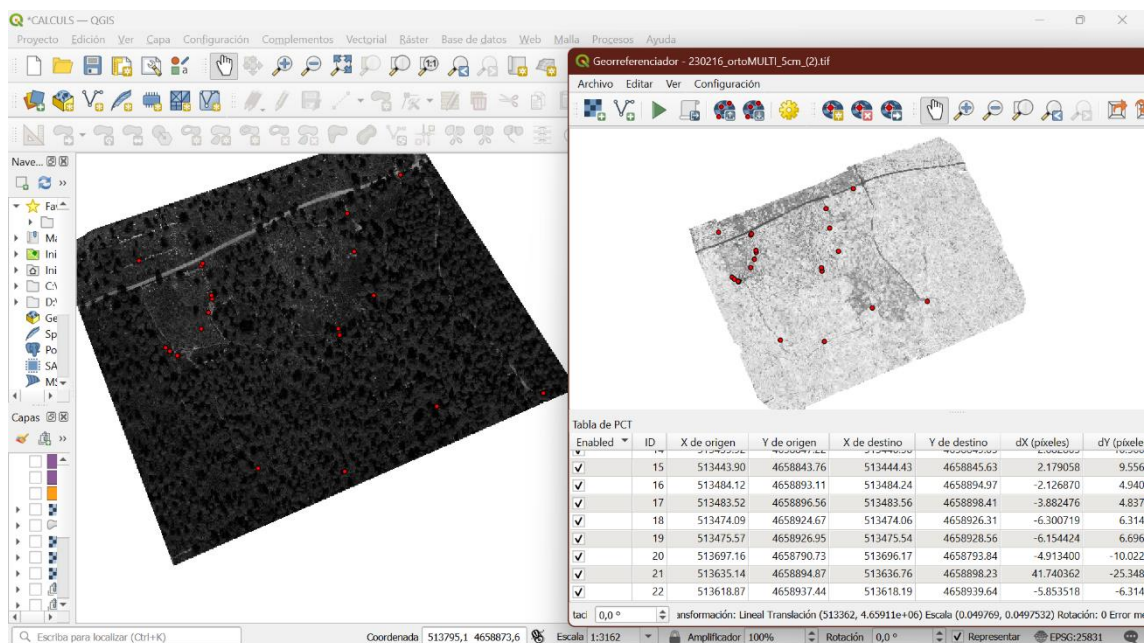


Figura 7. Quadre de treball del programa QGIS. S'observen els 22 punts utilitzats per georeferenciar els arxius ràster (punts en vermell). Aquest pas és necessari per a fer coincidir amb precisió els arxius i poder obtenir resultats fiables.

Concretament, a l'hora d'aplicar-lo en l'exploració d'àrees cremades, NDVI deixa de ser útil en àrees amb molta densitat de vegetació (saturació de clorofil·la i impossibilitat de distingir entre diferents graus d'espessor de la coberta vegetal). També passa a ser poc fiable en zones de vegetació cremada però encara viva; en aquests casos, l'índex és incapaç de diferenciar entre individus supervivents, però que han perdut les fulles, i individus completament calcinats. En situacions com aquestes cal utilitzar altres índexs o mesures biomètriques de la vegetació. Estudis com els de Escuin *et al.* (2008) comparen el NDVI amb altres índexs més específics i útils en casos en què deixa de ser fiable.

A falta de les dades de reflectància de l'escenari pre-crema a causa de problemes tècnics amb el disc dur, per a l'escenari pre-crema solament s'ha pogut calcular l'índex NDVI. Així i tot, s'ha calculat uns altres 5 índexs de la situació post-crema per a visualitzar la diversitat d'opcions disponibles (Taula 2).

Un dels desavantatges dels índexs uni-temporals (els que es basen solament en l'escenari post-crema) és que no distingeixen les masses d'aigua, sòl nu o vegetació baixa de les zones cremades. En canvi, els índexs bi-temporals (els que combinen dades de l'escenari previ i posterior al foc) no en són sensibles (Escuin *et al.*, 2008). Per això, a més dels 6 índexs uni-temporals, també s'ha calculat l'índex bi-temporal dNDVI. Aquest es defineix com la diferència entre el NDVI previ i posterior al foc i permet valorar

l'estat de la vegetació en referència a l'estat inicial (previ al foc). D'aquesta manera es pot avaluar si la vegetació ha millorat o ha empitjorat en un context temporal.

NDVI adopta un rang de valors de -1 a 1 (sòl nu i vegetació abundant, respectivament), mentre que el dNDVI té un rang de valors de -2 a 2 (elevada recuperació de la vegetació i elevada severitat d'incendi, respectivament).

Taula 2: Nom complet i fórmula dels índexs calculats en aquest treball per a l'escenari post-crema a partir de les reflectàncies vermella, blava, verda i propera a l'infraroig (RED, BLUE, GREEN i NIR, respectivament) (Petropoulos & Kalaitzidis, 2012)

ÍNDEX	FÒRMULA
Normalized Difference Vegetation Index	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
Visible Atmospheric Resistant Index	$VARI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED - BLUE}$
Ratio Vegetation Index	$RVI = \frac{NIR}{RED}$
Soil Adjusted Vegetation Index	$SAVI = \frac{NIR - RED}{(NIR + RED + 0,5) * (1 + 0,5)}$
Transformed Vegetation Index	$TVI = \sqrt{NDVI + 0,5}$
Enhanced Vegetation Index	$EVI = 2,5 * \left(\frac{NIR - RED}{(NIR) + (6 * RED) - (7,5 * BLUE) + 1} \right)$

Key & Benson (2006) van proposar diferents categories de graus de severitat d'incendi, segons diferents rangs de valors per a l'índex dNBR. No ha estat possible calcular-lo, ja que per fer-ho és necessari disposar de la reflectància infraroja d'ona curta (SWIR), que la càmera utilitzada en aquest treball no pot enregistrar. Tot i això, el rang de valors de dNBR també és de -2 a 2 (elevada recuperació de la vegetació i elevada severitat d'incendi, respectivament). Les categories proposades serveixen per il·lustrar la interpretació dels índexs bi-temporals (encara que els rangs proposats per al dNBR no siguin aplicables al dNDVI) (Taula 3).

3.e. Efectes sobre l'ecosistema forestal

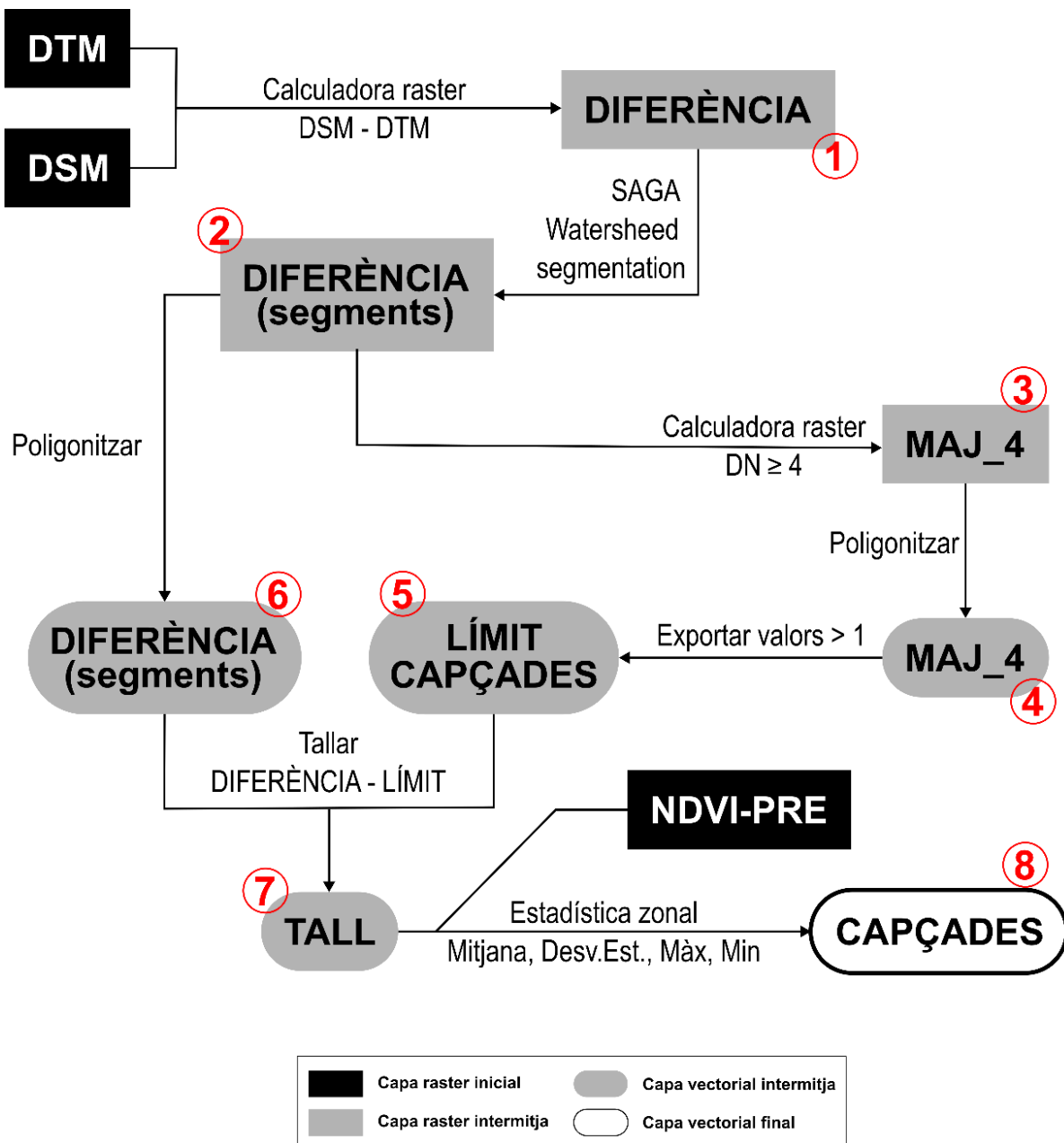
Aquest treball gira entorn els efectes del foc en l'ecosistema forestal. Per analitzar aquests efectes, cal aïllar la vegetació més alta. Utilitzant els arxius DTM i DSM generats amb el programa PIX4D i aplicant el complement de *watersheed segmentation* de SAGA, s'han delimitat les capçades dels arbres. La el procés seguit per a fer la delimitació es mostra en l'Esquema 1. S'ha considerat vegetació alta tota la que supera els 4 m d'alçada. Combinant aquesta informació amb l'índex NDVI, s'obté com a resultat la visualització dels efectes de la crema sobre l'estrat arbori.

Taula 3: Rang de valors de dNBR per a les diferents categories de severitat d'incendi. Els rangs de valors no són aplicables al dNDVI, però sí que s'interpreta de la mateixa manera: valors baixos (-2) indiquen bona recuperació de la vegetació, mentre que valors alts (2) indiquen elevada severitat de l'incendi (Key & Benson, 2006).

GRAU DE SEVERITAT	RANG DE VALORS (dNBR)
Recreixement millorat, alt	-0,5 a -0,251
Recreixement millorat, baix	-0,25 a -0,101
Sense cremar	-0,1 a 0,099
Baixa gravetat	0,1 a 0,269
Gravetat moderada-baixa	0,27 a 0,439
Severitat moderada-alta	0,44 a 0,659
Alta gravetat	0,66 a 1,3

3.f. Obtenció d'imatges satèl·lit

Les imatges satèl·lit de la zona d'estudi s'han obtingut a través del web *Copernicus BROWSER* (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>). Les imatges seleccionades prèvies a la crema daten de l'11 de febrer del 2024. Les imatges posteriors a la crema daten del dia 12 de març del 2024; no ha estat possible disposar d'imatges més properes a la data de la crema degut a l'elevada nuvolositat. Per a la descàrrega de les imatges cal crear un compte d'usuari, entrar al cercador i seleccionar l'àrea d'interès. Seguidament, s'obre un menú on escollir el tipus de dades a descarregar (índexs, bandes de reflectància, etc.). Per a aquest estudi, s'ha seleccionat com a àrea d'interès la zona que comprèn l'àrea d'estudi i s'han descarregat les imatges de reflectàncies i s'ha calculat l'índex NDVI.



Esquema 1. Procés que s’ha seguit per obtenir l’alçada de les capçades dins la zona d’estudi amb QGIS. S’ha iniciat per fer la resta entre DSM i DTM i obtenir la capa DIFERÈNCIA (1). Seguidament, s’han delimitat les àrees de diferents alçades de vegetació amb el complement *watersheed segmentation* de SAGA (2). Fent ús de la *calculadora ràster*, s’ha descartat tota la vegetació que no supera els 4 m d’alçada (3) i s’ha convertit a una capa vectorial (4). D’aquesta capa, s’han seleccionat i exportat els polígons amb valor = 1 per obtenir el límit de la zona representada per les capçades (5). La capa DIFERÈNCIA (segments) s’ha transformat a capa de tipus vectorial (6) aplicant l’eina *tallar* s’ha obtingut una capa que conté la delimitació exacta de cada capçada (7). Finalment, s’ha utilitzat l’eina *estadística zonal* per a calcular l’alçada de cada capçada segons el ràster NDVI-PRE (8). Aquest darrer pas s’ha repetit amb la capa NDVI-POST.

4. RESULTATS

4.a. Índexs de vegetació

S'han calculat 6 índexs de vegetació diferents per a l'escenari post-crema, per tal de visualitzar la varietat d'índexs disponibles per a l'exploració de la vegetació. S'ha calculat NDVI, TVI, VARI, SAVI, RVI i EVI.

Tal com s'observa a la Figura 9, la similitud entre NDVI i TVI és notable. Aquesta semblança és deguda al fet que el càlcul del segon es basa en el càlcul del primer (tal com s'ha mostrat anteriorment a la Taula 2). Segons Petropoulos & Kalaitzidis (2012), TVI es va plantejar amb la intenció d'evitar els valors negatius que s'obtenen en el càlcul de NDVI. Tot i això, comparteix les mateixes sensibilitats que NDVI.

L'índex VARI s'aplica quan la vegetació és escassa o quan la reflectància NIR no està disponible; de manera que el seu càlcul es basa en les bandes del visible, principalment la vermella i la verda; també afegeix la banda blava per tal de corregir els efectes de les condicions atmosfèriques. L'índex resulta menys sensible al sòl nu o les roques, però més a les ombres projectades per la vegetació.

SAVI consisteix en un índex que deriva del NDVI, però amb un factor de correcció que varia en funció del percentatge de cobertura de la vegetació i busca fer-lo més eficient. Així i tot, és sensible a les zones amb ombra. El mateix passa amb l'índex EVI, que es va plantejar com a correcció del SAVI enfront dels efectes atmosfèrics.

Finalment, RVI, el predecessor del NDVI, solament es calcula amb les bandes de reflectància vermella i propera a l'infraroig, però no presenta cap correcció per als efectes atmosfèrics. També és sensible al sòl nu i les roques, però no a les ombres.

4.b. NDVI

S'ha calculat l'índex NDVI per a l'escenari previ i posterior a la crema. També s'ha calculat l'índex bi-temporal, dNDVI. Per a l'escenari pre-crema, el mínim valor de NDVI és de 0,01, mentre que el màxim és de 0,94. En el cas de la situació posterior, el mínim és de -0,01 i el màxim de 0,96 (Figura 10). Pel que fa al dNDVI, el valor mínim és -0,68 i el màxim 0,73 (Figura 11).

El valor dels màxims i els mínims per a l'escenari previ i posterior a la crema són molt similars en aquest cas. Les cartografies mostren el canvi de valor de l'índex dins la zona de la crema, en forma de canvi de color.

S'ha obtingut un histograma ràster per a cada un dels escenaris; visualitzant així la freqüència de píxels per a cada valor de l'índex. La Figura 12 mostra l'histograma previ

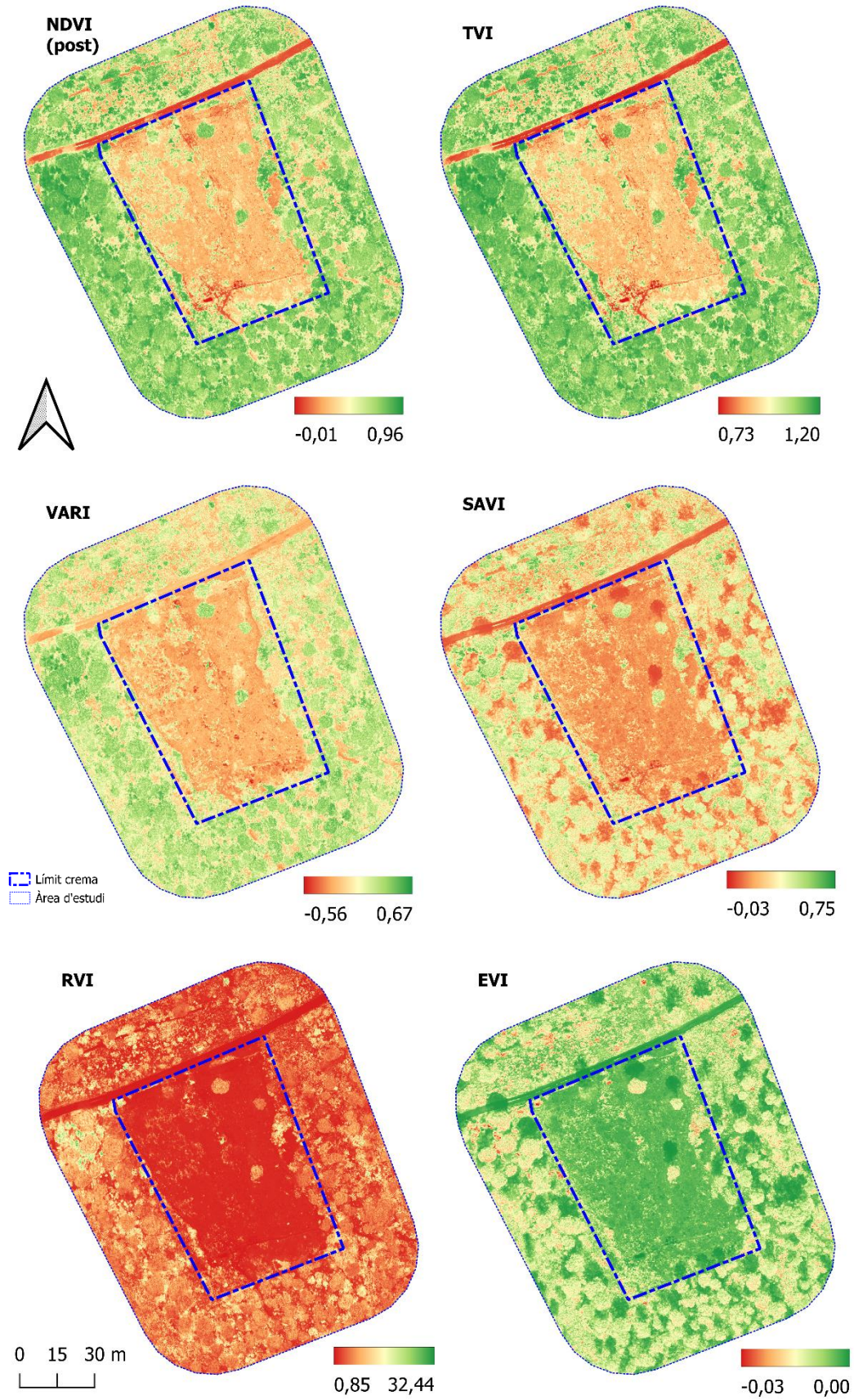


Figura 9. Mapes dels índexs calculats per a l'escenari post-crema.

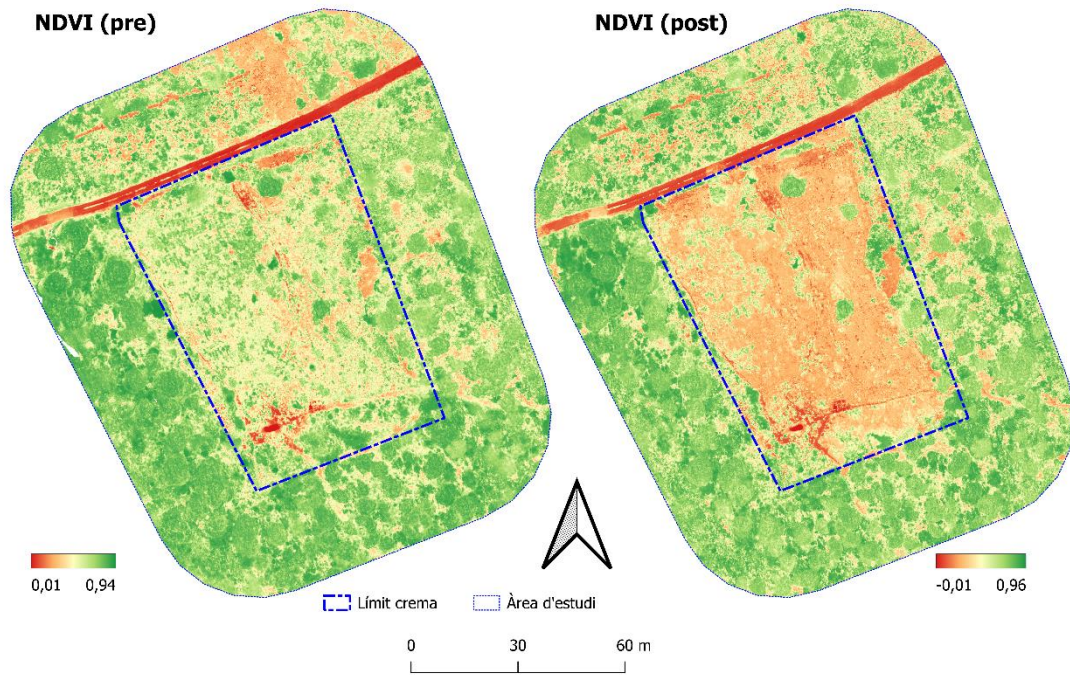


Figura 10. Mapes de l'índex NDVI abans i després de la crema.

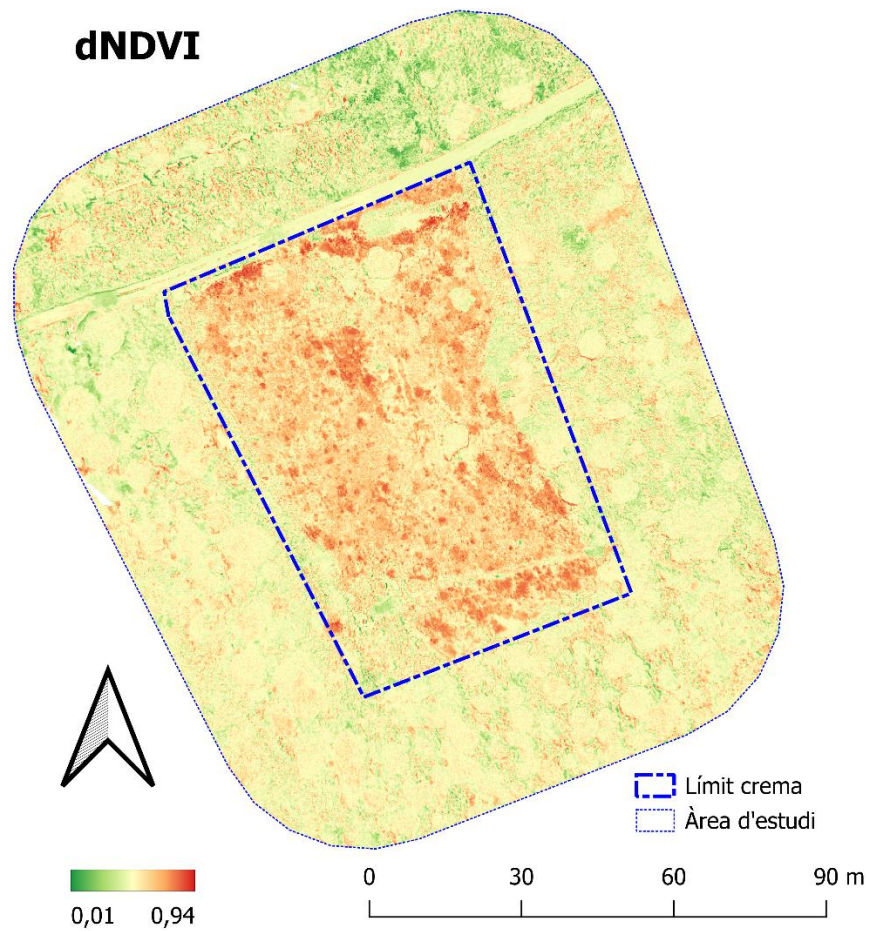


Figura 11. Mapa de l'índex dNDVI.

NDVI(pre)

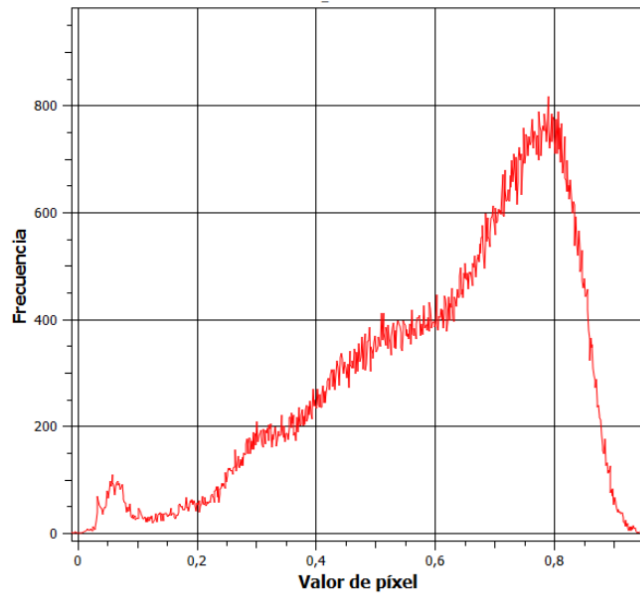


Figura 12. Histograma ràster per a NDVI (pre).

a la crema, en el que la majoria dels píxels tenen un valor de NDVI alt, al voltant de 0,8. Hi ha un lleuger cúmul de píxels amb valors baixos, al voltant de 0,05. Aquest petit conjunt de píxels podria correspondre a les zones del camí, la bassa i les roques; zones de sòl nu que l'índex detecta incorrectament com a àrees molt afectades pel foc.

Es detecta un canvi notable en l'histograma posterior a la crema, on la freqüència de píxels amb valors propers a 0,8 ha disminuït i amb valors propers a 0,3 ha augmentat (Figura 13).

NDVI (post)

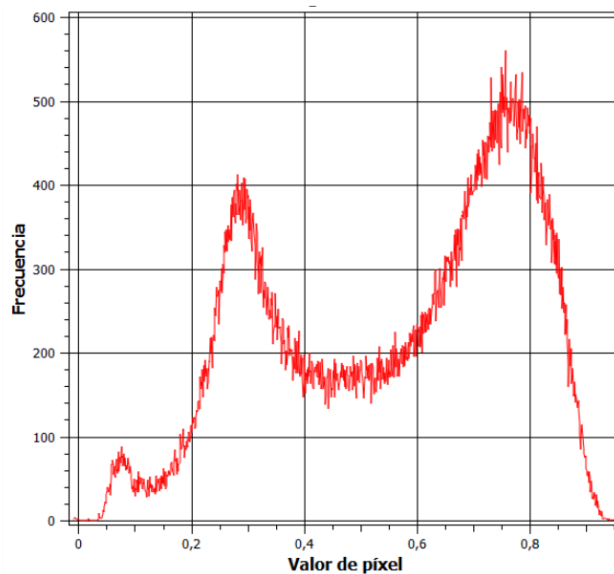


Figura 13. Histograma ràster per a NDVI (post)

Això reflecteix el canvi de valor de NDVI pels efectes de la crema, que es visualitza en les cartografies de la Figura 10 com un canvi de color dins l'àrea d'estudi. Encara és present el cúmul de píxels amb valors propers a 0,05. El fet que la seva freqüència i el seu rang de valors s'hagi mantingut igual al llarg del temps i hagi estat indiferent als efectes de la crema recolza la idea que es tracta de les zones del camí, la bassa i les roques.

En el cas de dNDVI, l'histograma segueix una distribució normal (Figura 14). La majoria dels píxels es troben al voltant del valor de 0, indicant que la major part de la vegetació s'ha mantingut igual. Els valors màxims i mínims, -0,68 i 0,73, indiquen que hi ha hagut zones on la cobertura de la vegetació ha disminuït i zones on ha augmentat.

dNDVI

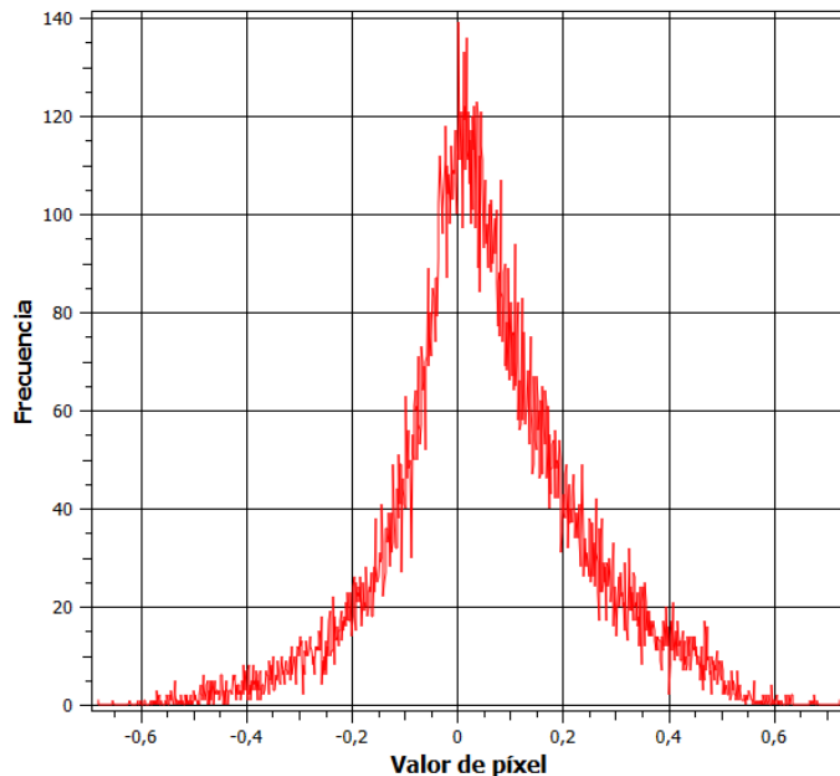


Figura 14. Histograma ràster per a dNDVI.

4.c. Efectes sobre la vegetació

En calcular el valor mitjà de NDVI (pre i post) dNDVI per a les capçades dels arbres, s'ha obtingut la cartografia que mostren la Figura 15 i Figura 16. Aquesta mostra que els arbres amb major afectació són, efectivament, els que es troben dins de l'àrea cremada.

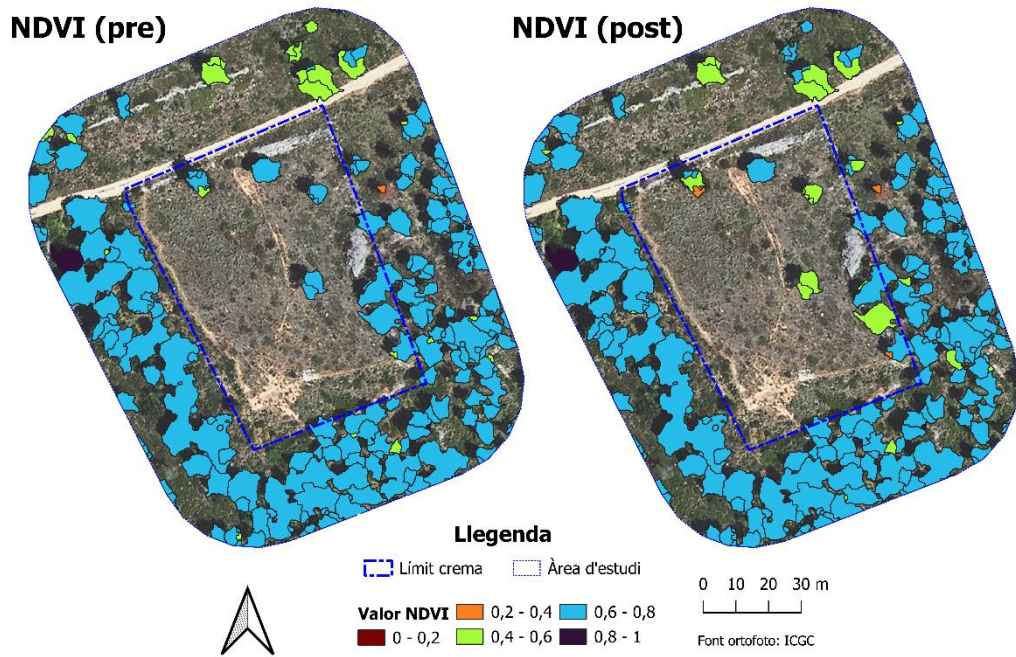


Figura 15. Mapa de les capçades segons el valor mitjà de NDVI per als escenaris previs i posterior a la crema.

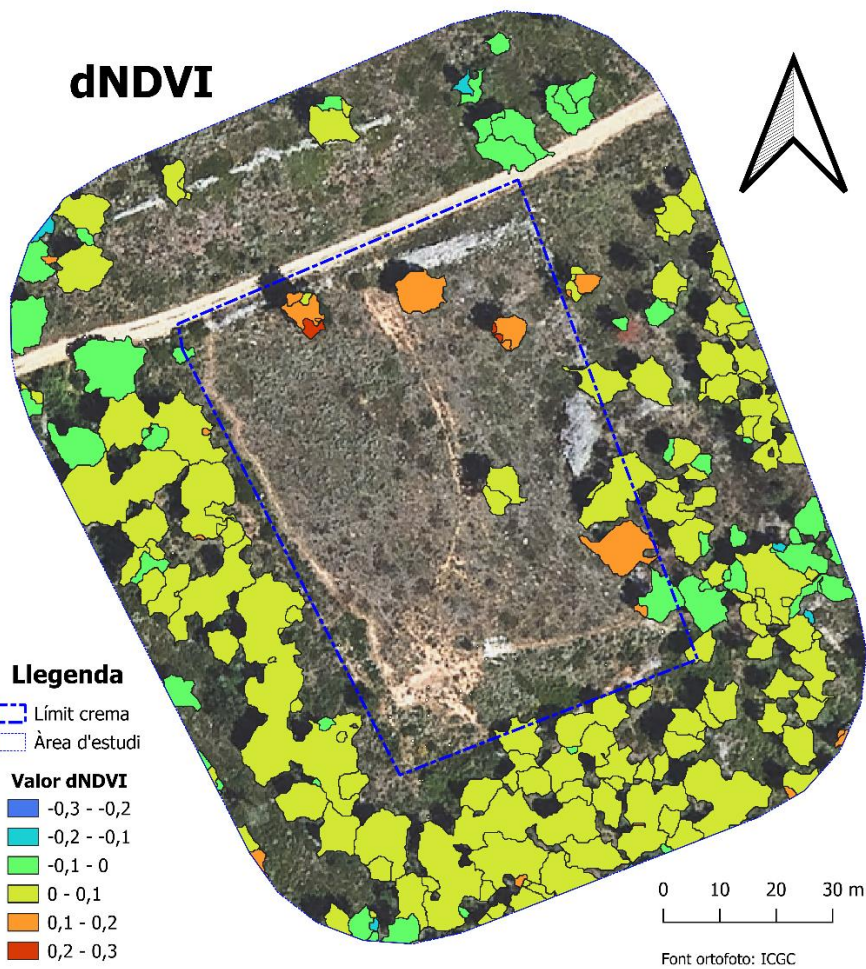


Figura 16. Mapa de les capçades segons el valor mitjà de dNDVI. Els valors negatius (colors verd-blavosos) indiquen recuperació de la vegetació; mentre que els valors positius (colors groc-vermellosos) indiquen vegetació afectada pel foc i disminució de clorofil·la.

Tot i això, fora l'àrea de crema s'hi troben capçades que presenten un valor de dNDVI positiu. Estant fora de la crema, l'augment del valor de l'índex el pot haver provocat algun altre factor que no sigui el foc, com per exemple, la sequera.

4.d. Comparativa amb imatges satèl·lit

La Figura 17 mostra la comparativa entre les imatges obtingudes per mitjà de satèl·lit i dron, per als escenaris previs i posteriors a la crema. Les imatges de reflectància obtingudes del Sentinel-2 L2A tenen una mida de 10 m/px, mentre que les del dron són de 3,5 cm/px. La resolució del satèl·lit no permet distingir les capçades dels arbres, mentre que la del dron sí.

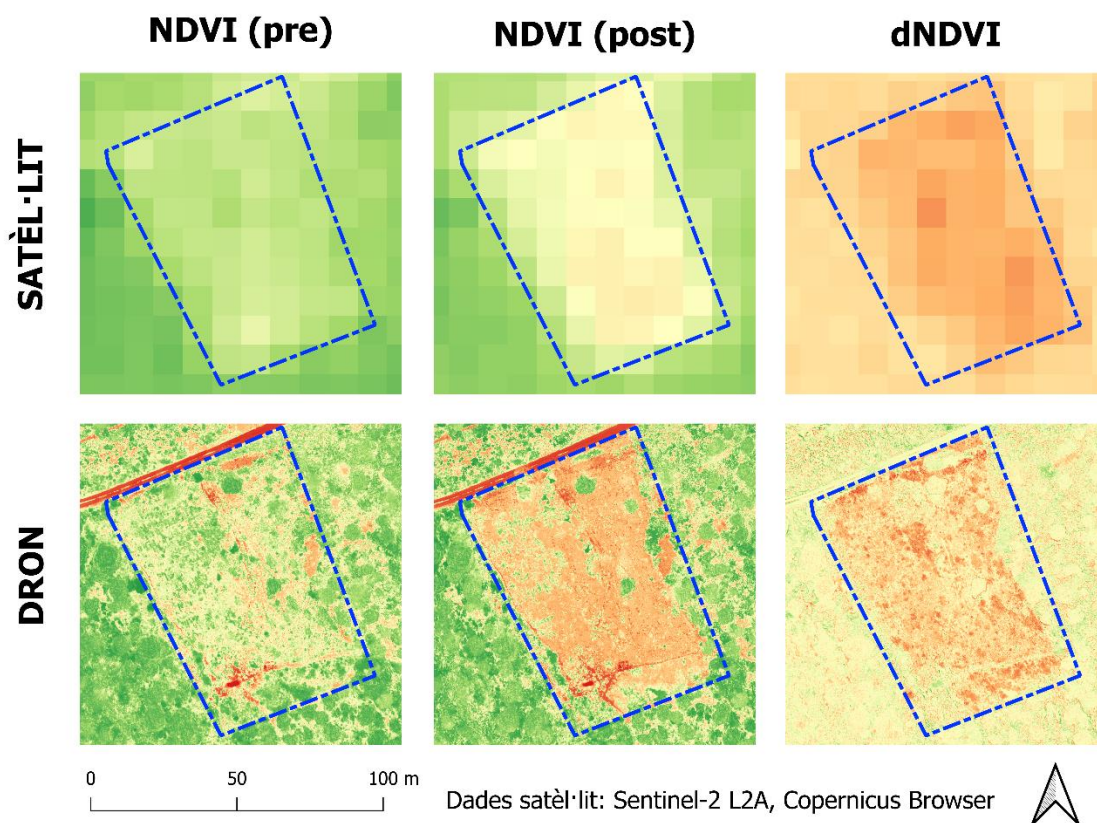


Figura 17. Comparativa de les imatges obtingudes amb satèl·lit i dron per a NDVI (pre), NDVI (post) i dNDVI

S'observa que la baixa resolució de les imatges de satèl·lit també afecta al rang de valors de NDVI i dNDVI, sent un rang molt més estret en relació amb el dron (Taula 4).

Taula 4: Valors mínims i màxims de NDVI i dNDVI per les imatges de satèl·lit i dron.			
	NDVI (pre)	NDVI (POST)	dNDVI
Satèl·lit	0,46 / 0,87	0,31 / 0,81	-0,02 / 0,28
Dron	0,01 / 0,94	-0,01 / 0,96	-0,68 / 0,73

5. DISCUSSIÓ

Aquest estudi pretenia posar a prova l'ús de drons per a fer l'exploració de zones forestals cremades, valorar la tipologia de resultats que ofereix i la complexitat metodològica que suposa. La zona d'estudi se situa en una àrea on els equips de bombers fan cremes controlades de manera regular.

La metodologia ha presentat alguns reptes. L'ús de dues càmeres diferents ha augmentat la complexitat del procés. La càmera òptica ZEMNUSE P1, al ser de la mateixa marca que el dron, ha estat fàcil de configurar i controlar. A la vegada, la georeferenciació de les imatges resulta molt senzilla, ja que en comunicar-se directament amb el GPS del dron, accedeix a les correccions en temps real de l'Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya.

En canvi, la càmera multiespectral Micasense ALTUP-PT no es comunica directament amb el dron, de manera que el calibratge òptic no és automàtic (cal fer-ho a partir de dianes). La configuració s'ha de fer amb un programari a part del de pilotatge del dron i la georeferenciació no coincideix amb les imatges de la càmera òptica ja que no accedeix a les correccions de l'ICGC (condicionant que s'hagi de georeferenciar la imatge posteriorment). Aquesta georeferenciació manual no és perfecta, però cal que sigui com més exacta millor, per tal de poder realitzar càlculs fiables

A l'hora de realitzar els càlculs, solament s'ha pogut calcular el NDVI per a la situació prèvia i posterior a la crema, per la pèrdua de les imatges multiespectrals prèvies a la crema.

Els diferents índexs de vegetació calculats per a l'escenari posterior a la crema, a banda de NDVI, il·lustren la diversitat d'índexs que s'han plantejat fins ara per a explorar la vegetació amb teledetecció (encara que solament és una petita mostra del total d'índexs disponibles).

La sensibilitat d'aquests a diferents factors els fa idonis per a uns usos o condicions concretes i caldrà escollir quin índex utilitzar en funció d'això. En zones amb coberta densa, on no hi ha ombres, els índexs VARI, VASI o EVI poden ser d'utilitat. Però, si s'exploren zones amb arbres esparsos, índexs que siguin resistents a les ombres projectades, com ara el NDVI, el TVI o el RVI, seran més fiables. Per tant, és de gran utilitat conèixer l'estructura forestal de la zona d'estudi a l'hora d'escollir amb quin índex treballar.

Els mapes de NDVI mostren el canvi en el valor de l'índex en la zona de la crema, observable en el canvi de color, de tons verds a vermells. El nivell de detall de les

imatges permet distingir les capçades. En tractar-se d'una crema controlada, el foc tendeix a ser de baixa severitat i no arriba a cremar les copes dels arbres. Això és observable en la cartografia del NDVI (post), on s'observen taques de color verd enmig de la zona cremada.

Els histogrames per a l'escenari previ i posterior a la crema mostren clarament la redistribució dels píxels. La freqüència de píxels de valor 0,8 disminueix i passa a acumular-se al voltant del valor de 0,3; l'histograma passa de ser pràcticament uni-modal a ser bi-modal.

Com ja s'ha comentat, el cúmul de píxels amb valors baixos, comuns en els dos histogrames, corresponen als píxels que en els dos casos es mantenen com a zones d'elevada severitat incorrectament. NDVI, sensible al sòl nu i l'aigua, interpreta el camí, la bassa i les roques com una zona consumida pel foc, observable en l'histograma com un petit cúmul de píxels.

La cartografia de dNDVI mostra la major part de la zona exterior a la crema de colors grocs, indicant que la major part d'aquesta vegetació s'ha mantingut igual, ni ha cremat ni ha crescut. Això mateix s'observa en l'histograma corresponent, on la major part dels píxels es troben al voltant de valor 0. En canvi, l'interior de la zona de crema presenta tonalitats vermelloses i valors positius de dNDVI, indicant que aquí la vegetació s'ha reduït. En l'histograma es percep un cúmul de píxels lleugerament major en els valors positius, indicant que, en conjunt, la vegetació dins la zona d'estudi ha empitjorat.

En la recerca de bibliografia no s'ha trobat cap classificació dels graus de severitat de la crema en funció del rang de valors de dNDVI. Però sí que s'ha trobat per a dNBR. Els dos índexs tenen el mateix rang de valors; -2 per a vegetació recrescuda i 2 per a elevada severitat de crema.

De cara a futurs treballs de teledetecció basats en dNDVI, elaborar una classificació per a l'índex permetria comparar resultats entre diferents cremes. Delimitar les àrees dins de l'incendi segons el grau de severitat facilitaria la tasca de gestió forestal de les àrees cremades.

Per elaborar aquesta taula, caldria fer una valoració in situ de l'estat de la vegetació i categoritzar aquestes zones (si s'utilitzen les mateixes categories que les proposades per al NBR, no solament es podria comparar entre cremes avaluades amb dNDVI, sinó també amb dNBR). Amb aquest treball de camp, caldria comparar els resultats amb els obtinguts amb teledetecció i assignar un rang de valors de dNDVI per a cada categoria.

L'exploració pel que fa a les capçades mostra que els arbres de dins la zona de crema s'han vist lleugerament afectats pel foc (valor mínim de NDVI (post) de 0,3 (rang -1, 1) i màxim de dNDVI de 0,28 (rang -2, 2)); és un resultat esperable, ja que, com s'ha comentat anteriorment, en les cremes controlades es busca consumir el combustible baix, herbes i matolls, però no els arbres.

Tot i això, s'observa que moltes de les capçades dels arbres exteriors a la crema tenen valors de dNDVI majors que 0, indicant que la seva vigorositat ha disminuït. Al no haver estat afectats pel foc, la raó d'aquests resultats ha de ser un altre. Una possible explicació seria l'episodi de sequera que ha patit tot el territori català en els mesos previs a la captació de les imatges. Aquesta hipòtesi es podria comprovar fent treball de camp, per avaluar si aquest estat de la vegetació es pot atribuir a la sequera.

Amb la delimitació de les capçades tan exacta, s'obren les portes a realitzar altres càlculs per ampliar l'exploració de l'àrea cremada. Amb l'ús de dades lidar d'alta resolució, es poden generar models de superfície (DSM) i a partir d'aquests calcular l'alçada o la biomassa aproximada de cada arbre. Això permetria dur a terme una anàlisi més complet dels efectes del foc, més enllà de la concentració de clorofil·la.

Finalment, la comparativa de les imatges obtingudes amb dron amb les obtingudes amb satèl·lit mostra clarament els avantatges de l'elevada resolució del dron. Gràcies a aquesta, s'han pogut aïllar les capçades i avaluar els efectes de la crema arbre per arbre. Poder delimitar les àrees afectades pel foc amb tanta definició resulta una eina molt útil per a la gestió posterior d'aquests espais. L'exploració de la vegetació i les àrees cremades amb satèl·lits té els seus avantatges, tal com es mostren a la taula 1, i pot ser útil quan es tracta d'àrees de gran extensió i no es requereix detall.

A petita escala el dron resulta més detallat, però també més exacte a l'hora de quantificar la gravetat del foc, tal com es mostra a la taula 4. Al comparar els valors màxims i mínims obtinguts per al dron i per al satèl·lit s'observa que les imatges de baixa resolució generalitzen el valor de NDVI i no es percep la realitat de la crema.

Aquest treball pretenia fer una valoració de l'ús de drons per a l'exploració d'àrees forestals cremades. De cara a futurs treballs, aquest estudi mostra que caldria tenir en compte que l'ús d'aquesta tecnologia presenta alguns reptes a nivell metodològic. A aquests, que estan relacionats amb la naturalesa dels instruments necessaris, cal sumar-hi els contratemps que podem trobar al treball de camp. A l'hora de volar el dron ens podem trobar amb situacions de mal temps, vent fort, mala cobertura o senyal, presència de rapinyaires, etc. Aquests factors imprevisibles poden dificultar i endarrerir la captura de les imatges, afectant al resultat final.

En aquest estudi s'han obtingut diferents resultats, en forma de cartografies, histogrames i taules de valors. L'obtenció d'aquests, un cop processades les imatges, no presenta gaires complicacions, més enllà de les comentades al llarg del treball. Aquests resultats permeten fer-nos una idea detallada de l'estat de la vegetació sense necessitat de recórrer a peu la zona d'estudi. Amb l'ús dels drons s'agilitza el procés i s'obren les portes a explorar zones més àmplies i oferir informació molt detallada per a la gestió posterior al foc.

6. CONCLUSIONS

In this study that explores the footprint of fires in forest ecosystems with the use of drones, it is observed that the use of this technology can facilitate and speed up field work, offering very precise results that can be of great use to in the subsequent management of the burned areas.

The results obtained lead us to a series of conclusions:

First, a great knowledge of how drones, cameras and software work will allow you to anticipate potential obstacles and work out how to overcome them.

Secondly, it is very useful to know first hand the structure of the vegetation, in order to choose the most appropriate vegetation index for our study.

Third, the NDVI index is sensitive to bare soil, rocks, and water, but it was sufficient to clearly detect burned air. The corresponding bi-temporal index has given rise to results that show the decrease in vegetation due to fire, but also possibly due to drought, in the area outside the burn.

fourthly, the delimitation of the tops which makes it possible to reduce the information at the individual level of each tree and to observe the effects of burning. This information could be expanded with measures of tree cover or height to make it more complete and explore the effects of fire on other variables beyond NDVI.

Finally, the comparison of drone images with satellite images shows that the former is very useful for working on a small scale and with a high level of detail, while the former is useful on a large scale or as a preliminary exploration.

7. BIBLIOGRAFIA

Altum-PT - Sensores para drones. (s.d.). AgEagle Aerial Systems Inc. Recuperat 15 maig 2024, de <https://ageagle.com/es/drone-sensors/altum-pt/>

Aquilué, N., Fortin, M.-J., Messier, C., & Brotons, L. (2020). The Potential of Agricultural Conversion to Shape Forest Fire Regimes in Mediterranean Landscapes. *Ecosystems*, 23(1), 34-51. <https://doi.org/10.1007/s10021-019-00385-7>

Assmann, J. J., Kerby, J. T., Cunliffe, A. M., & Myers-Smith, I. H. (2019). Vegetation monitoring using multispectral sensors—Best practices and lessons learned from high latitudes. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 7(1), 54-75. <https://doi.org/10.1139/juvs-2018-0018>

Bowman, D. M. J. S., Balch, J., Artaxo, P., Bond, W. J., Cochrane, M. A., D'Antonio, C. M., DeFries, R., Johnston, F. H., Keeley, J. E., Krawchuk, M. A., Kull, C. A., Mack, M., Moritz, M. A., Pyne, S., Roos, C. I., Scott, A. C., Sodhi, N. S., & Swetnam, T. W. (2011). The human dimension of fire regimes on Earth: The human dimension of fire regimes on Earth. *Journal of Biogeography*, 38(12), 2223-2236. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2011.02595.x>

Bradshaw, S. D., Dixon, K. W., Hopper, S. D., Lambers, H., & Turner, S. R. (2011). Little evidence for fire-adapted plant traits in Mediterranean climate regions. *Trends in plant science*, 16(2), 69-76.

Cámaras multiespectrales | HIBA Formación. (s.d.). Recuperat 3 juny 2024, de <https://learningdata.hubiberiagro.tech.eu/camaras-multiespectrales/>

Cervera, T., Pino, J., Marull, J., Padró, R., & Tello, E. (2019). Understanding the long-term dynamics of forest transition: From deforestation to afforestation in a Mediterranean landscape (Catalonia, 1868–2005). *Land Use Policy*, 80, 318-331. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2016.10.006>

Chergui, B., Fahd, S., Santos, X., & Pausas, J. G. (2018). Socioeconomic Factors Drive Fire-Regime Variability in the Mediterranean Basin. *Ecosystems*, 21(4), 619-628. <https://doi.org/10.1007/s10021-017-0172-6>

Data | Landsat Science. (2021, novembre 30). <https://landsat.gsfc.nasa.gov/data/>

Donato, D. C., Fontaine, J. B., Campbell, J. L., Robinson, W. D., Kauffman, J. B., & Law, B. E. (2009). Conifer regeneration in stand-replacement portions of a large mixed-severity wildfire in the Klamath–Siskiyou Mountains. *Canadian Journal of Forest Research*, 39(4), 823-838. <https://doi.org/10.1139/X09-016>

Dupuy, J., Fargeon, H., Martin-StPaul, N., Pimont, F., Ruffault, J., Guijarro, M., Hernando, C., Madrigal, J., & Fernandes, P. (2020). Climate change impact on future wildfire danger and activity in southern Europe: A review. *Annals of Forest Science*, 77(2), 35. <https://doi.org/10.1007/s13595-020-00933-5>

Escuin, S., Navarro, R., & Fernández, P. (2008). Fire severity assessment by using NBR (Normalized Burn Ratio) and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) derived from LANDSAT TM/ETM images. *International Journal of Remote Sensing*, 29(4), 1053-1073. <https://doi.org/10.1080/01431160701281072>

Explore Copernicus satellite missions. (s.d.). Sentinel Online. Recuperat 26 abril 2024, de <https://copernicus.eu>

- Fassnacht, F. E., Schmidt-Riese, E., Kattenborn, T., & Hernández, J. (2021). Explaining Sentinel 2-based dNBR and RdNBR variability with reference data from the bird's eye (UAS) perspective. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 95, 102262.
- Francos, M., Pereira, P., Alcañiz, M., & Úbeda, X. (2018). Post-wildfire management effects on short-term evolution of soil properties (Catalonia, Spain, SW-Europe). *Science of The Total Environment*, 633, 285-292. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.03.195>
- ICGC - Vissir3. (s.d.). Recuperat 9 maig 2024, de <http://srv.icgc.cat/vissir3/>
- Kane, V. R., Lutz, J. A., Roberts, S. L., Smith, D. F., McGaughey, R. J., Povak, N. A., & Brooks, M. L. (2013). Landscape-scale effects of fire severity on mixed-conifer and red fir forest structure in Yosemite National Park. *Forest Ecology and Management*, 287, 17-31.
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape assessment (LA). *FIREMON: Fire effects monitoring and inventory system*, 164, LA-1.
- Lloret, F., & Marí, G. (2001). A comparison of the medieval and the current fire regimes in managed pine forests of Catalonia (NE Spain). *Forest Ecology and Management*, 141(3), 155-163. [https://doi.org/10.1016/S0378-1127\(00\)00323-6](https://doi.org/10.1016/S0378-1127(00)00323-6)
- Mapa geològic de Catalunya. (s.d.). Recuperat 9 maig 2024, de https://betaportal.icgc.cat/visor/client_utfgrid_geo.html
- Matrice 300 RTK - Drones de inspección cartográfica industrial—DJI Enterprise. (s.d.). DJI. Recuperat 15 maig 2024, de <https://enterprise.dji.com/es/photo>
- Ne'eman, G., Lev-Yadun, S., & Arianoutsou, M. (2012). Fire-related traits in Mediterranean basin plants. *Israel Journal of Ecology & Evolution*, 58(2-3), 177-194.
- Pausas, J. G., & Fernández-Muñoz, S. (2012). Fire regime changes in the Western Mediterranean Basin: From fuel-limited to drought-driven fire regime. *Climatic Change*, 110(1), 215-226. <https://doi.org/10.1007/s10584-011-0060-6>
- Per què Catalunya crema. (s.d.). Ara.cat. Recuperat 31 març 2024, de <https://interactius.ara.cat/incendis/>
- Petropoulos, G. P., & Kalaitzidis, C. (2012). Multispectral vegetation indices in remote sensing: An overview. *Ecol. Model*, 2, 15-39.
- Programa de cremes prescrites. (s.d.). Departament d'Interior. Recuperat 3 juny 2024, de http://interior.gencat.cat/ca/arees_dactuacio/bombers/foc-forestal/programa-de-cremes-prescrites/
- Roberts, S. L., Van Wagendonk, J. W., Miles, A. K., Kelt, D. A., & Lutz, J. A. (2008). Modeling the Effects of Fire Severity and Spatial Complexity on Small Mammals in Yosemite National Park, California. *Fire Ecology*, 4(2), 83-104. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0402083>
- Turner, M. G., Romme, W. H., Gardner, R. H., & Hargrove, W. W. (1997). EFFECTS OF FIRE SIZE AND PATTERN ON EARLY SUCCESSION IN YELLOWSTONE NATIONAL PARK. *Ecological Monographs*, 67(4), 411-433. [https://doi.org/10.1890/0012-9615\(1997\)067\[0411:EOFSAP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9615(1997)067[0411:EOFSAP]2.0.CO;2)

Ursino, N., & Romano, N. (2014). Wild forest fire regime following land abandonment in the Mediterranean region. *Geophysical Research Letters*, *41*(23), 8359-8368.
<https://doi.org/10.1002/2014GL061560>

Vallejo, V. R., & Alloza, J. A. (2012). Post-Fire Management in the Mediterranean Basin. *Israel Journal of Ecology and Evolution*, *58*(2-3), 251-264.
<https://doi.org/10.1560/IJEE.58.2-3.251>

van Mantgem, P. J., Nasmith, J. C. B., Keifer, M., Knapp, E. E., Flint, A., & Flint, L. (2013). Climatic stress increases forest fire severity across the western United States. *Ecology Letters*, *16*(9), 1151-1156. <https://doi.org/10.1111/ele.12151>

Viedma, O., Moreno, J. M., & Rieiro, I. (2006). Interactions between land use/land cover change, forest fires and landscape structure in Sierra de Gredos (Central Spain). *Environmental Conservation*, *33*(3), 212-222.
<https://doi.org/10.1017/S0376892906003122>

Wasserman, T. N., & Mueller, S. E. (2023). Climate influences on future fire severity: A synthesis of climate-fire interactions and impacts on fire regimes, high-severity fire, and forests in the western United States. *Fire Ecology*, *19*(1), 43.
<https://doi.org/10.1186/s42408-023-00200-8>