

Caracterització de les tempestes causants d'incendis de llamp

Autora: ANNA SOLER MAZA

Supervisor: JOAN BECH, joan.bech@ub.edu

Facultat de Física, Universitat de Barcelona, Martí i Franquès 1, 08028 Barcelona, Espanya*.

Resum: Una de les principals amenaces dels boscos de Catalunya, i que es preveu que empitjorà amb el canvi climàtic, són els incendis forestals. Al voltant d'un 10% d'aquests incendis són causats per llamps; per aquest motiu seria interessant poder identificar les descàrregues i tempestes amb més probabilitat d'acabar generant un incendi per tal de reduir la seva incidència en el territori. Amb aquest objectiu en ment, aquest treball analitza les descàrregues elèctriques i les tempestes associades als incendis de llamp esdevinguts a Catalunya durant els anys 2012-2018. D'una banda, s'han estudiat les característiques dels llamps (polaritat, multiplicitat i intensitat del corrent de pic), però s'ha vist que no presenten trets diferencials a la població general de llamps i, per tant, són poc útils per identificar els llamps més perillosos de causar incendis. D'altra banda, s'han analitzat diverses característiques de les tempestes (velocitat, durada, longitud del recorregut i reflectivitat). Aquesta anàlisi mostra que les variables més útils per identificar tempestes amb més probabilitat de generar incendis estan estretament lligades a la quantitat de precipitació associada. Aquestes tempestes acostumen a ser ràpides i bona part de les descàrregues es produeixen als estadis finals de la tempesta, per la qual cosa no hi ha aigua suficient per apagar una possible ignició. També s'ha vist que el 58% de les descàrregues que causen incendis estan associades a reflectivitats radar inferiors a 35 dBZ.

I. INTRODUCCIÓ

Una de les problemàtiques medi ambientals més greus a les que s'enfronta Catalunya són els incendis forestals. El clima mediterrani de Catalunya, amb estius calorosos i secs (Martín-Vide et al 2010), la complexa orografia i la gran extensió de superfície forestal –aproximadament un 67% de la superfície catalana són boscos, Idescat 2020– suposen un risc significatiu d'incendi forestal per a gran part del territori català. Malgrat que la majoria d'incendis a Catalunya són causats per l'activitat humana, ja sigui per accident, descuit o intencionadament, també n'hi ha d'origen natural (San-Miguel-Avanz et al 2019). Segons dades del Servei de Prevenció d'Incendis Forestals (SPIF), els incendis causats per un llamp a Catalunya representen el 10,4% del conjunt d'incendis forestals. Tenint present que de mitjana ocorren uns 60.000 llamps anuals a Catalunya, i que els incendis per llamp són uns 56 per any segons el SPIF (mitjana 2012-2018), això vol dir que, aproximadament, hi ha un incendi de llamp cada 1.000 llamps.

A nivell operatiu seria convenient poder assignar una probabilitat d'incendi als llamps que ocorren al nostre país. D'aquesta manera, les tasques de control i vigilància de llamps denominats "adormits" podrien focalitzar-se en els llamps amb major probabilitat (i reduir aquests 1.000 llamps per incendi a un volum més controlable).

En el procés d'ignició per l'impacte d'un llamp en el combustible forestal i posterior incendi hi intervenen molts factors, però qui aporta l'energia que possibilita la ignició és el component de corrent continu que segueix a la descàrrega de retorn del llamp. Malgrat la seva curta durada, en els llamps núvol-terra (en endavant NT) s'hi distingeixen diverses fases. El llamp s'inicia amb un traçador descendent (el traçador esglaonat) que va formant la típica estructura ramificada dels llamps, del núvol cap a terra. A mesura que el traçador esglaonat s'acosta a la superfície, se'n forma un d'ascendent (el traçador de connexió). Tots dos traçadors es troben i es forma un canal ionitzat altament conductor, per on es genera la descàrrega de retorn, una descàrrega amb una durada d'uns 100 μ s i amb un fort corrent elèctric. Si el procés acaba aquí, tenim un llamp de descàrrega simple. Sovint, si encara hi ha

càrrega disponible, es produeixen descàrregues secundàries, normalment menys intenses (Pineda et al 2011).

En relació als focs causats per llamps, les dues fases rellevants són la descàrrega de retorn i la fase de corrent continu (de l'ordre de 100-500 A). La primera origina un fort corrent elèctric, de fins a desenes de kA, però de molt curta durada (de l'ordre de la mil·lèsima de segon). Per contra, la segona proporciona una alta temperatura i pot durar fins a desenes de segons (tècnicament s'anomena *Long Continuing Current*, LLC, quan dura més de 40 ms). Es considera que la presència d'una LLC després de la descàrrega de retorn és la que pot provocar ignició en els combustibles forestals (Fuquay et al 1967). Mentre que la descàrrega de retorn és present a tots els llamps NT, s'estima que aquest corrent continu posterior a la descàrrega només es dona en alguns llamps. Segons Uman (1987), el 20% de llamps negatius presenten corrent continu, mentre que en els llamps positius, menys freqüents, el percentatge de llamps amb corrent continu és del 85%. Altres treballs (Saba et al 2006; 2010) parlen de valors del 37% pels negatius i 75% pels positius.

Els sistemes de detecció remota de llamps, com el que opera el Servei Meteorològic de Catalunya (SMC), a banda de proporcionar unes coordenades per a cada llamp, també registren característiques com les descàrregues per llamp i el corrent de pic o polaritat de cada descàrrega. Malauradament, no registren la component de corrent continu, que realment és el tipus de corrent que pot generar una ignició al combustible forestal i que pot acabar derivant en un incendi. Per aquest motiu, diferents autors han proposat fer servir característiques que sí es poden mesurar amb aquests sistemes per determinar si el llamp presenta LLC (el que es coneix com a *proxy*). Principalment, les variables dels NT que s'han proposat com a *proxy* són la polaritat, el corrent de pic de la descàrrega i la multiplicitat del llamp.

D'una banda, Flannigan i Wotton (1991), van suggerir que els llamps amb més multiplicitat, pel fet de produir més NT, tenen una probabilitat més alta de provocar un incendi forestal. En canvi, Larjavaara et al (2005) van plantejar el contrari, que com més descàrregues tingui un llamp menys probabilitat d'ignició tindrà associada el llamp. Això no coincideix amb els resultats de Pineda et al (2014), que mostren que no hi ha un augment de la probabilitat d'ignició quan la multiplicitat augmenta; al contrari, van comprovar que la proporció de

* Adreça electrònica: asolerma17@ub.edu

llamps amb una sola descàrrega és més elevada en els llamps causants d'incendis que en la mitjana poblacional. Per tant, sembla que la multiplicitat del llamp no és un bon *proxy* de la LLC i no es pot fer servir per identificar llamps més propensos a generar un incendi.

D'altra banda, Flannigan i Wotton (1991) van trobar que els llamps negatius tenen més probabilitat de causar una ignició. Contràriament, Latham i Williams (2001) i McGuiney et al (2005) van suggerir que les descàrregues positives tenen més probabilitat d'iniciar un incendi perquè són més intenses que les negatives. En canvi, treballs de Larjavaara (2005), Hall i Brown (2006) i Pineda et al (2014) demostren que la polaritat dels llamps amb més probabilitat de causar incendis és similar a la polaritat de la població climàtica. Aquests resultats dispersos, podrien venir explicats pel fet que els llamps positius tenen una major probabilitat de portar LLC però, en proporció, hi ha menys llamps positius (Saba et al 2006; 2010).

En relació amb això, alguns treballs s'han centrat a estudiar aquest LLC. Segons Rakov i Uman (2003) les descàrregues que inicien un LLC acostumen a tenir un corrent de pic inferior a la mitjana i acostumen a estar precedides per un interval de descàrregues curt. Totes les descàrregues poden portar associat un LLC (Saba et al 2006; Ferro et al 2009), però s'ha trobat una proporció inferior en descàrregues negatives. Els resultats de Pineda et al (2014), derivats de l'anàlisi de vídeos d'alta velocitat de llamps naturals, mostren que quasi tots els llamps poden presentar un LLC i només les descàrregues negatives de més de 20 kA no en presenten. Pel que fa l'interval de descàrregues que precedeix el LLC, a Catalunya és un 40% més curt que l'interval poblacional.

Davant d'aquests resultats, que mostren que els llamps amb més probabilitat d'ignició d'un incendi forestal no presenten característiques diferents als poblacionals, altres treballs s'han centrat a estudiar altres factors que poden tenir-hi un paper important, com les característiques de les tempestes. Keränen (1929), Kitterman (1980) i Granström (1993) van suggerir que les tempestes aïllades de tarda tenen major probabilitat de generar un incendi que les tempestes associades al pas de fronts. Segons Larjavaara (2005) la probabilitat d'ignició és més elevada en tempestes de baixa intensitat, perquè tot hi haver-hi menys llamps, aquests tenen poca precipitació associada i, per tant, la possible ignició té més probabilitats d'acabar en incendi. Rorig i Ferguson (2002) i Larjavaara (2005) suggereixen que en les zones on una tempesta s'ha desplaçat ràpidament, hi ha una acumulació més baixa de pluja i això comporta un increment en la probabilitat d'ignició d'un incendi. Segons Hall (2008) les descàrregues amb més probabilitat de causar incendis es produeixen als marges de les tempestes, on la precipitació és escassa o nul·la. En conseqüència, el fet que les tempestes amb àrees més petites tinguin proporcionalment més perímetre que tempestes d'àrees extenses, fa que la probabilitat d'ignició sigui més elevada en dies en què hi ha moltes tempestes petites que no pas en dies amb menys tempestes però més extenses (Flannigan i Wotton 1991). Segons Pineda i Rigo (2017), el camp de precipitació pot ajudar a seleccionar llamps amb una major probabilitat de causar un incendi. Així com la majoria de descàrregues es troba a les zones on s'hi acumula més precipitació, les descàrregues amb més probabilitat de causar un incendi generalment se situen en àrees amb gens o poca precipitació. És el concepte dels *dry lightning* o llamps secs (Dowdy i Mills 2012). La ignició causada per aquests llamps té més

probabilitat d'acabar en incendi perquè la precipitació a la zona serà feble o nul·la i serà més difícil que apagui la ignició. En canvi, en els nuclis convectius de la tempesta, tot i tenir molts més llamps, i conseqüentment més ignicions, aquestes són apagades per la precipitació intensa.

Amb aquestes idees en ment, aquest treball té com a objectiu principal determinar si hi ha un tipus de tempesta amb major probabilitat de generar un incendi forestal. Així, es vol determinar si hi ha una fase de la tempesta més perillosa i veure quines variables afecten la probabilitat que es produeixin incendis. Més concretament, es pretén analitzar la velocitat, la longitud del recorregut i la durada de les tempestes que presenten llamps que causen incendis. També es vol determinar en quina fase de la tempesta hi ha més descàrregues causants d'incendis i si aquestes se situen dins o fora de la zona més convectiva de la tempesta (reflectivitat radar >35 dBZ). Abans de tot, però, també s'analitzen característiques dels incendis i dels llamps que els originen en front de la població climàtica.

II. DESENVOLUPAMENT

Abans d'entrar en matèria, és convenient fer un apunt sobre la terminologia emprada en aquest treball en relació a les fases d'un incendi de llamp: ignició, eclosió i latència. En primer lloc, la descàrrega d'un llamp genera una ignició. L'hora d'aquesta ignició és la que registra la Xarxa de Detecció de Descàrregues Elèctriques del SMC (XDDE) associada a la descàrrega assignada a l'incendi. Després hi ha l'hora d'eclosió de l'incendi, que es correspon a l'hora del registre del SPIF. El període entre aquests dos instants de temps s'anomena període de latència. En aquest període, el foc pot estar latent (per exemple a la soca de l'arbre) i no fer eclosió fins que les condicions ambientals són favorables. També pot ser que la ignició generi un foc de baixa intensitat que no és detectat pels agents rurals fins que agafa més intensitat.

A. DADES I MÈTODE

Base dades del Servei de Prevenció d'Incendis Forestals

Segons les dades del SPIF publicades al web del Departament d'Agricultura, a Catalunya en el període 1986-2019 hi va haver 21.686 incendis forestals, que van afectar un total de 264.000 hectàrees. D'aquests incendis, el 10,4% es va originar per un llamp i, per tant, en aquests 34 anys hi ha hagut uns 2.250 incendis causats per llamps. Això suposa una mitjana de 66 incendis de llamp per any. En el període del present estudi (2012-2018) a Catalunya es van registrar un total de 393 incendis de llamp (mitjana anual de 56) i van cremar un total de 1.420 ha forestals (figura 1).

Xarxa XDDE i seguiment de tempestes

Les dades de llamps han estat proporcionades per la XDDE. Aquesta xarxa està composta de quatre detectors VAISALA LS8000 repartits pel territori català que cobreixen tota la regió de Catalunya. Els algorismes de localització del processador central fan servir una tècnica que combina l'azimut del senyal rebut amb el temps d'arribada d'aquest senyal. Els llamps NT es detecten amb un sensor de baixa freqüència (LF) fent servir una combinació de la tècnica *Time of arrival / Magnetic Direction Finding* descrita per Cummins

i Murphy (2009). L'eficiència de detecció i la precisió en la localització, presenten valors per la XDDE dins dels rangs normals per aquest tipus de sistemes de detecció remota (Montanyà et al 2006).

Per estudiar l'evolució del cicle de vida de les tempestes, l'SMC utilitza un mètode que combina paràmetres de radar i de llamps: mitjançant les dades de radar identifica entre estructures de precipitació i nuclis convectius i, mitjançant les dades de llamps, identifica estructures de llamps NN (núvol-núvol) i NT (Rigo et al 2008; 2010).

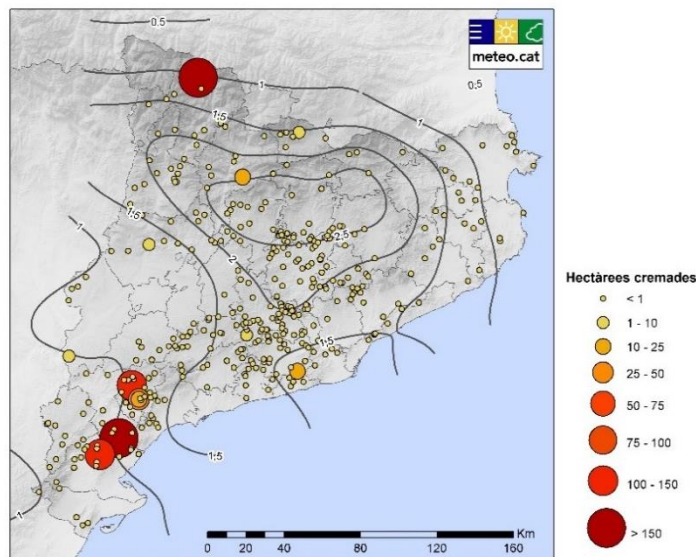


Figura 1. Distribució dels incendis forestals provocats per un llamp registrats a Catalunya durant el període 2012-2018, les hectàrees cremades i la densitat mitjana de llamps 2004-2019 (isolínies, llamps per km² i any).

Selecció de candidats

La base de dades d'incendis proporcionada pel SPIF conté data, hora i coordenades del punt d'inici de cada incendi causat per un llamp. Aquestes dades provenen de la tasca que fan els agents rurals al territori i són validades pel SPIF. A partir d'aquestes dades, cal buscar quin dels llamps registrats per la XDDE és el millor candidat d'haver causat l'incendi. Cal tenir present que el llamp en qüestió pot haver ocorregut hores abans (l'eclosió del foc no sempre és immediata) i també cal recordar que hi ha una incertesa sobre les coordenades del llamp, que en cap cas es corresponen a la localització de l'impacte del llamp en superfície sinó a una solució estadística del mètode de localització de llamps que fa servir el processador de la XDDE (Montanyà et al 2006). Per tant, cal fer un exercici estadístic per seleccionar el conjunt de llamps que poden ser l'origen de l'incendi i donar probabilitats als candidats per acabar seleccionant el candidat més probable (d'ara endavant, CMP).

Així, per seleccionar d'entre totes les descàrregues que es produeixen a prop d'un incendi forestal quina és la millor candidata de causar la ignició, s'ha fet servir el mètode descrit a Pineda et al (2014) i que és una adaptació de l'índex de proximitat proposat per Larjavaara et al (2005). Aquesta aproximació també ha estat utilitzada per Moris et al (2020) en el seu treball sobre incendis de llamp als Alps:

$$P = \left(1 - \frac{T}{72}\right) \times \left(1 - \frac{S}{10}\right) \quad (1)$$

Aquest índex (P) té en compte, d'una banda, el temps (T) que transcorre entre la descàrrega registrada pel detector i el moment d'ignició registrat per SPIF (limitat a 72 h perquè latències superiors a 3 dies són molt poc freqüents a la zona d'estudi) i, de l'altra, la distància (S) entre les dues observacions (limitada a 10 km en base l'error de la XDDE).

Cal fer notar que no es calcula la distància respecte de les coordenades del llamp sinó respecte del punt més proper de l'el·lipse de probabilitat dins la qual es troba el llamp i que determina millor la zona d'impacte. Aquesta aproximació és més realista perquè el llamp pot haver impactat en qualsevol punt a l'interior de l'el·lipse. En aquest punt, cal fer un incís sobre l'el·lipse del llamp. Per tal de caracteritzar la precisió de la posició calculada per cada llamp NT, es fa servir una el·lipse que circumscriu una regió de probabilitat, centrada en la localització calculada (solució òptima). Cada llamp té associades 5 variables amb les quals es pot representar geogràficament l'el·lipse de confiança associada a cada solució: la 1 i la 2 són les coordenades geogràfiques (longitud i latitud) de la solució òptima per cada llamp (centre de l'el·lipse), la 3 i la 4 són els semi-eixos major i menor de l'el·lipse de confiança (per una probabilitat del 50%) i la 5 és l'orientació, en graus respecte del nord geogràfic, de l'eix semi-major de l'el·lipse. Així, tal i com es representa a la figura 2, hi poden haver candidats més propers segons l'àrea de l'el·lipse que si només ens fixéssim en la distància al centre de l'el·lipse, tal i com va fer servir Pineda et al (2014).

S'ha fet servir l'equació (1) per buscar candidat a la base de dades de la XDDE per als 393 incendis de llamp del període del present estudi (2012-2018). D'aquests incendis, 22 no tenen cap descàrrega associada; és a dir, no hi ha registre de cap llamp en el període i distància que es tenen en compte per calcular l'índex de proximitat.

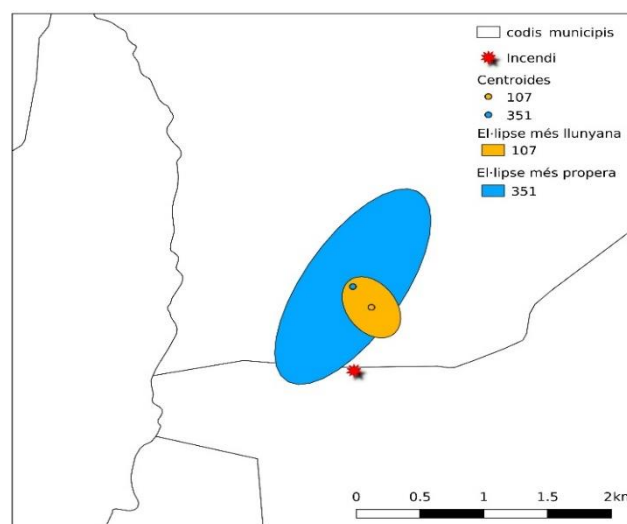


Figura 2. Exemple d'assignació de CMP a un incendi. Cada descàrrega té un centroide i una el·lipse d'incertesa associats. En aquest cas l'incendi és assignat el centroide 351.

Característiques de les tempestes

S'ha aprofitat el producte de seguiment de tempestes de l'SMC per tal d'analitzar les tempestes que han originat els candidats seleccionats anteriorment. Cal tenir present que la resolució temporal de les dades radar de l'SMC és de sis minuts, i per tant els productes de seguiment i caracterització

de tempestes es generen amb aquesta cadència. Mitjançant aquest producte, i utilitzant tècniques de SIG (Sistema d'Informació Geogràfica), s'han creuat els centroides de les tempestes esdevingudes durant les hores de les descàrregues dels diferents CMP. El mètode utilitzat per determinar les tempestes "mare" dels CMP ha estat escollir els centroides de la tempesta més propera a la descàrrega candidata (tant espacialment com temporal). Amb aquest procediment, s'han pogut assignar tempestes a 259 incendis (algunes no s'han pogut assignar per no tenir-ne el registre o per no poder-la assignar amb certesa a cap CMP). Un cop determinada la tempesta "mare" del candidat, se n'ha analitzat el cicle de vida.

B. RESULTATS

En aquest treball s'ha comparat la població de tots els llamps NT registrats per la XDDE entre el 2010 i el 2019 amb els llamps amb una probabilitat més alta d'haver causat un incendi forestal (CMP) entre el 2012 i el 2018 i s'han analitzat les tempestes associades a aquests CMP. Per calcular el CMP s'ha aplicat l'índex de proximitat (descriu anteriorment) a totes les descàrregues properes als 393 incendis de llamp durant aquest període i, per cada un, s'ha escollit la descàrrega amb un índex més alt. Descomptant els 22 incendis sense candidat, queda una mostra de 371 incendis i 371 CMP.

Característiques dels llamps

Com s'ha explicat a la introducció, com que els sistemes de detecció remota de llamps no detecten la component de corrent continu, diversos autors han proposat una sèrie de *proxys* per tal de determinar si les descàrregues presenten LLC i, per tant, poden haver desencadenat un incendi. Aquests *proxys* són la polaritat, multiplicitat i corrent de pic de les descàrregues. A la taula I de l'Annex es presenten els resultats de l'anàlisi que s'ha fet d'aquestes variables pel conjunt de candidats seleccionats de la XDDE. Es comparen els candidats (CMP) amb els valors del conjunt de la població NT (2010-2019).

Pel que fa a la polaritat, els resultats mostren valors força similars entre els NT i la mostra de CMP. Mentre que climàticament el 85% de llamps NT són negatius i el 15% són positius, en els CMP aquests percentatges són del 77% pels negatius i del 23% pels positius.

En relació a la multiplicitat sí que hi ha diferències entre les dues poblacions. En els NT el 41% dels llamps negatius presenten més d'una descàrrega, mentre que pels CMP aquest

percentatge s'eleva al 61%; i en llamps positius els llamps múltiples són un 24% pels NT i un 43% pels CMP. Si es mira el nombre de descàrregues per llamp, es veu que, de mitjana, els NT negatius tenen 1,7 descàrregues/llamp i els NT positius en tenen 1,3, mentre que els CMP en tenen 2,9 i 1,9 respectivament.

Un altra característica dels llamps que s'ha analitzat és el corrent de pic de la primera descàrrega del llamp. La diferència més gran es troba en els màxims. Això pot ser degut al fet que la mostra de CMP és molt més petita que la de NT. Si apliquem el teorema de Bayes per calcular la probabilitat d'una descàrrega de causar un incendi segons la intensitat del corrent de pic (figura 3) es veu que totes les probabilitats són molt baixes. És a dir, el corrent de pic no sembla un bon indicador per distingir un CMP de la població general de descàrregues. No obstant això, s'intueix que, tot i ser baixes, les descàrregues d'intensitats més elevades i les descàrregues positives en conjunt tenen probabilitats més altes de causar un incendi que no pas les descàrregues d'intensitats més baixes o negatives.

Distància

Un altre factor analitzat és la distància entre la descàrrega i el lloc d'inici de l'incendi. En aquest cas, la distància correspon a la distància entre el punt on el SPIF ha registrat l'incendi i l'el·lipse de la descàrrega (punt més proper a l'el·lipse d'error associada a les coordenades del llamp).

Com era d'esperar, en la majoria dels incendis el llamp és molt a prop del punt on s'ha produït l'incendi. El 76% de les àrees de les el·lipses està a menys d'1 km del punt d'ignició i el 94% a menys de 3 km (figura 4). A partir dels 5 km gairebé no n'hi ha cap.

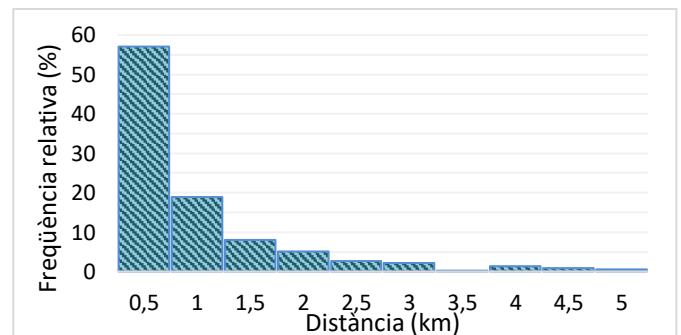


Figura 4. Distància en intervals de 0,5 km, entre el CMP i l'incendi.

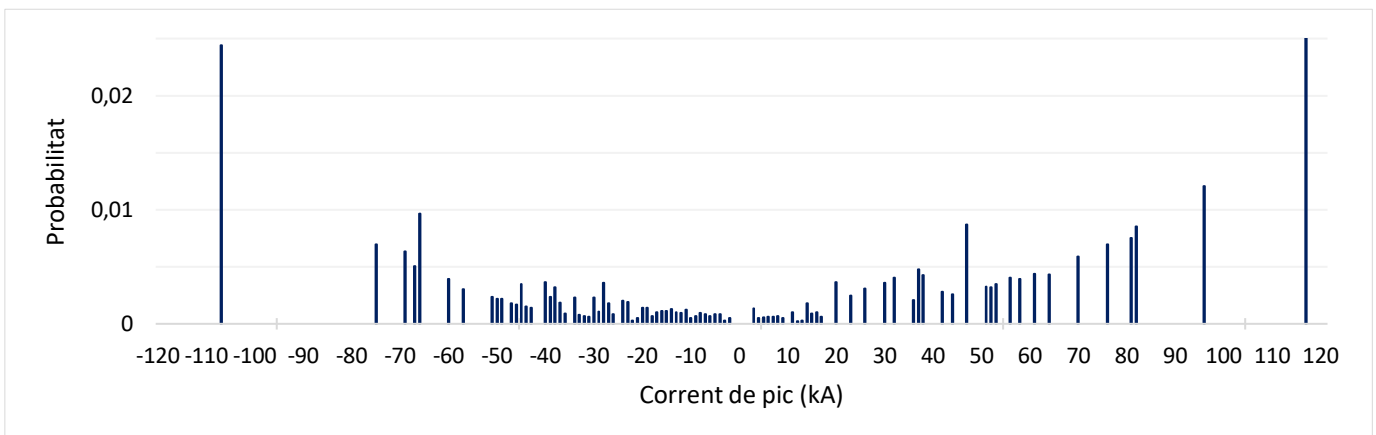


Figura 3. Probabilitat d'una descàrrega de causar un incendi en funció el corrent de pic (kA) de la primera descàrrega.

Estacionalitat

Els incendis de llamp estudiats tenen lloc entre els mesos de març i novembre, amb una major incidència en els mesos d'estiu, ja que és el moment de l'any en què hi ha més tempestes i la temperatura és més elevada. De fet, els incendis esdevinguts entre els mesos de juny, juliol i agost corresponen al 80% dels totals observats.

Si es compara l'estacionalitat dels incendis de llamp amb la del conjunt d'incendis forestals (període 1994-2018, dades SPIF), es veu com l'estacionalitat és més marcada per als incendis de llamp. Així com els incendis de llamp esdevinguts als mesos d'estiu sumen un 80%, el percentatge estival per al conjunt d'incendis és del 48%. Per contra, així com hi ha incendis durant tot l'any, els de llamp es limiten al període entre març i novembre. Aquesta marcada estacionalitat es pot relacionar amb dos factors: d'una banda, les tempestes, que es concentren als mesos d'estiu i són testimonials entre novembre i març (Pineda et al 2011): si no hi ha llamps, no hi haurà ignicions ni focs de llamp. D'altra banda, l'estacionalitat encara és més marcada pels focs de llamp que per les tempestes: aquí entra el factor ambiental, ja que les altes temperatures, combinades amb la baixa humitat, afavoreixen que les ignicions causades pels llamps acabin en incendi.

Hora de l'eclosió i latència

Pel que fa les hores en què es produeixen les eclosions, aquestes són més freqüents a les hores centrals del dia, que és quan fa més calor i la humitat relativa és més baixa. El 56% tenen lloc entre les 12 T.U.¹ i les 18 T.U. En canvi, a la nit gairebé no s'inicia cap incendi i només el 10% es produeixen entre les 21 T.U. i les 6 T.U..

Si comparem les hores d'inici del conjunt de la població d'incendis forestals amb la dels incendis de llamp (figura 5) es pot observar com les hores en què es desencadenen més focs també són les de la tarda. Hi ha, però, algunes diferències. S'observa un decalatge entre les dues categories: els incendis de llamp comencen l'increment abans i assoleixen el màxim 3 hores abans. En canvi, la població total assoleix el màxim entre les 15 T.U. i 18 T.U., havent-n'hi més a les hores de tarda-vespre. Aquests incendis són independents de les tempestes i, per tant, sovint l'ambient és més sec i calorós, per tant, es donen les condicions ambientals necessàries perquè comenci l'incendi. Relacionat amb això, els incendis de llamp comencen a aparèixer a la matinada i primeres hores del matí, quan ja no plou i el Sol augmenta la temperatura, la qual cosa fa eclosionar el foc latent (ignició a la tarda o vespre anterior).

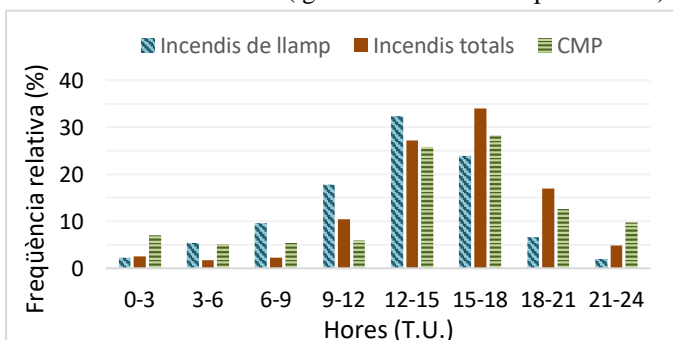


Figura 5. Distribució horària dels incendis de llamp, el conjunt d'incendis forestals i els CMP

¹ T.U.: Temps universal

Aquest decalatge s'explica pel fenomen de la latència que es dona en els incendis de llamp. La precipitació associada a la mateixa tempesta que genera el llamp sovint impedeix l'eclosió de l'incendi, que queda latent. Així, un incendi de llamp es pot originar hores, o fins i tot dies, després de la descàrrega elèctrica. A partir de les 19 T.U. hi ha més descàrregues que no pas incendis, és a dir que a partir d'aquella hora les condicions deixen de ser les propícies per a l'eclosió dels incendis, que es mantenen latents fins a última hora de la matinada. En canvi, entre les 13 T.U. i les 18 T.U. la proporció d'incendis i CMP és similar, ja que a les hores centrals del dia, degut a l'alta temperatura, els incendis eclosionen al cap de poca estona de la ignició.

Pel que fa a la latència, una mica més de la meitat dels incendis (57%) s'originen en les 3 hores següents a la descàrrega i, a partir d'aquest temps, la freqüència relativa del temps de latència és força homogènia.

La figura I de l'Annex analitza la relació entre el temps de latència i l'altitud del punt d'inici de l'incendi, partint de la premissa que a major altitud, la temperatura serà menor, fet que pot dificultar l'eclosió del foc i augmentar-ne la latència. Si bé hi ha molts més incendis a cotes baixes, s'observa com aquesta va augmentant amb l'altitud. Si ens hi fixem, podem observar-hi tres grups: la latència més baixa, de menys d'una hora o de poques hores, que se situa entre els 0 i els 800 metres; la latència mitjana, al voltant de les 7-8 hores, situada en altituds d'entre 800 i 2.000 metres; i, per últim, les latències més elevades, al voltant de les 8 hores, que es troben en altituds de més de 2.000 metres, on les temperatures són més baixes.

Recorregut de la tempesta

Un altre aspecte que s'ha analitzat és el recorregut de les tempestes associades als CMP. Aquest recorregut s'ha calculat a partir de les distàncies entre els centroides consecutius (cada 6 minuts) obtinguts amb l'algorisme de seguiment de les tempestes. A la figura 6 es pot veure com gairebé dos terços de les tempestes es desplacen entre 10 i 45 km (60%) i la mediana és de 36 km.

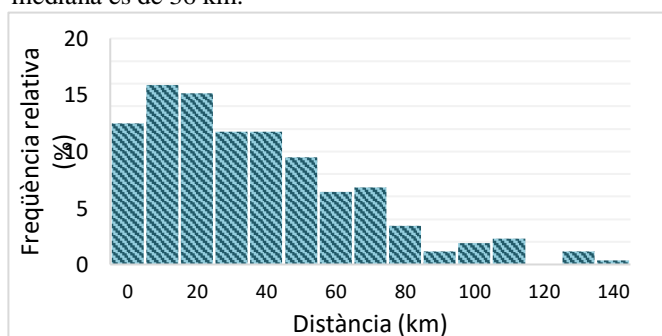


Figura 6. Distància recorreguda per les tempestes associades a CMP.

Durada de la tempesta i moment de la descàrrega

El moment d'inici i final de les tempestes que han originat incendis de llamp s'ha establert a partir dels centroides obtinguts del producte radar i s'ha calculat fent la diferència entre les hores del primer i últim centroide. La figura 7a mostra la distribució de la durada de les tempestes. Amb una mediana de 66 minuts, la distribució està esbiaixada, amb una majoria

de tempestes de curta durada i unes poques per sobre de les tres hores. La meitat per sota de la mediana presenta una moda de 30 minuts, mentre que la meitat que està per sobre la mediana té una moda de 80 minuts. Les poques que presenten una durada inferior als 20 minuts deuen ser tempestes que han quedat tallades per una fallada del sistema de *tracking*.

S'ha considerat apropiat normalitzar la durada de les tempestes per poder analitzar en quin percentil de les mateixes es produeixen els CMP. A diferència de la figura anterior, la figura 7b presenta els CMP en funció de la durada normalitzada i no de la durada en minuts. En aquest cas, ja no s'observa un increment tan sobtat a l'inici, sinó que s'assoleix el màxim en el tercer percentil. Així mateix, hi ha una segona moda en el percentil 70. Tenint present les tres fases d'una tempesta (desenvolupament, maduresa i dissipació), la fase de dissipació presenta un major nombre de CMP respecte els NT.

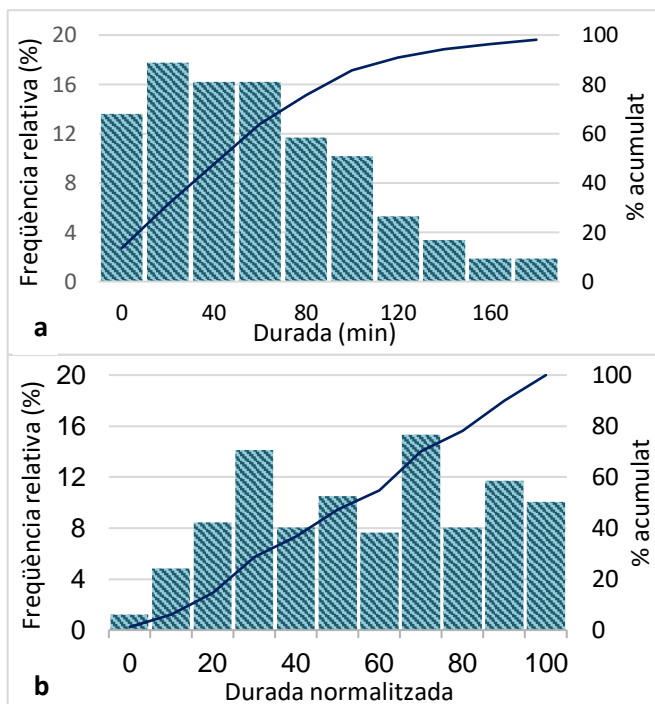


Figura 7. Distribució de la durada de les tempestes (a). Distribució de l'instant en què es produeixen els CMP en les tempestes amb la durada normalitzada (b).

Velocitat de la tempesta

El fet de saber la distància de desplaçament i la durada de les tempestes, permet calcular-ne la seva velocitat. A la figura 8 observem que no hi ha una tendència clara en quant a una durada característica de les tempestes amb CMP associats (tant la mediana com la mitjana són de 36 km/h).

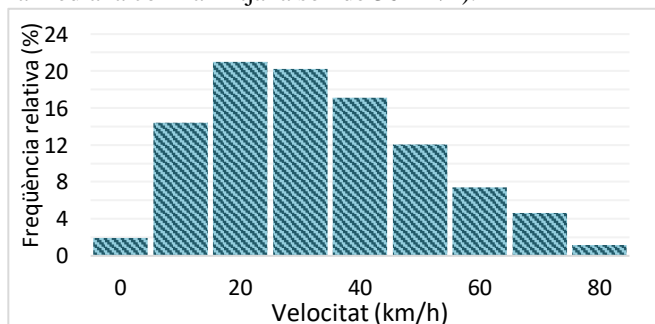


Figura 8. Distribució de la velocitat de les tempestes.

Pràcticament no hi ha tempestes que es desplacin a una velocitat inferior als 11 km/h i cap no supera els 86 km/h.

Reflectivitat associada

Un altre dels paràmetres estudiats és la reflectivitat associada a les descàrregues causants d'incendis i que s'ha analitzat a partir del producte radar CAPPI del SMC (figura 9). D'una banda s'ha analitzat si els CMP es produeixen dins o fora de l'àrea de 35 dBZ de reflectivitat (CAPPI 1 km). S'ha escollit el valor de 35 dBZ perquè és on se situa típicament la regió mixta d'una tempesta, que és on trobem aigua en forma líquida i sòlida. En aquesta regió es donen la majoria de processos de càrrega elèctrica no inductiva. A més, hi ha estudis que han trobat que aquesta reflectivitat és un bon predictor de la intensitat de descàrregues elèctriques (Basarab et al 2015) i que és un bon *proxy* de les intensitats de precipitació màximes dels sistemes convectius (Salvador et al 2020).

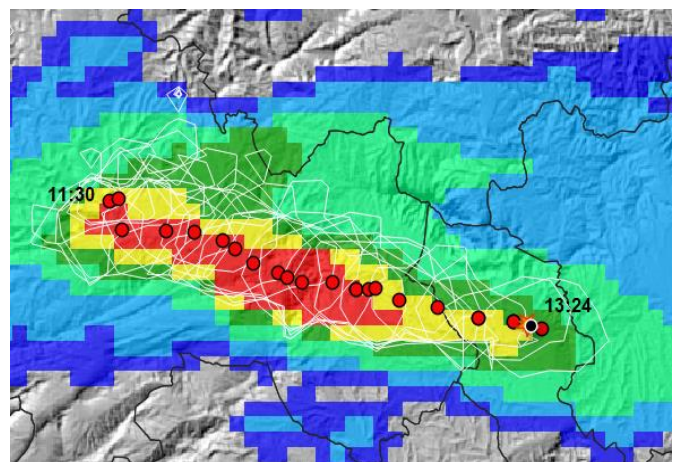


Figura 9. Representació d'una tempesta i incendi del 02/10/16. L'àrea de colors correspon a la reflectivitat d'una imatge CAPPI 1 km de les 16:24 T.U.; les línies blanques corresponen als contorns de reflectivitat de 35 dBZ de tota la tempesta, els punts vermells són els centroides de la tempesta; el punt negre és el CMP; i l'estrella taronja és l'incendi de llamp.

La reflectivitat s'ha analitzat de dues maneres. En primer lloc, s'ha mirat si el CMP està dins l'àrea de 35 dBZ de qualsevol punt de la tempesta o dins l'àrea de 35 dBZ corresponent només a l'hora de la descàrrega. En segon lloc, s'ha buscat la reflectivitat associada a cada CMP. Alhora, també s'ha buscat la reflectivitat de totes les descàrregues NT de la tempesta sencera. Els resultats es mostren en les figures II i III de l'Annex, que mostren, respectivament, la reflectivitat del CAPPI 1 km i la reflectivitat màxima d'entre els 10 nivells dels que es compona el CAPPI (1 a 10 km).

Si mirem les reflectivitats del CAPPI 1 km gairebé la meitat dels NT de les tempestes analitzades està vinculada a reflectivitats per sobre de 40 dBZ (48%). Així mateix, els llamps associats a reflectivitats inferiors a 30 dBZ només representen el 20%. En canvi, els CMP amb reflectivitats per sobre de 40 dBZ només són un 20%, mentre que el 40% estan associats a reflectivitats per sota de 30 dBZ. Així mateix, un 10% corresponen a reflectivitats per sota de 20 dBZ.

Fixant-nos en les reflectivitats màximes, més de la meitat dels NT estan vinculats a reflectivitats superiors a 40 dBZ (63%). Així mateix, els llamps associats a reflectivitats

inferiors a 30 dBZ representen el 10%. En canvi, els CMP amb reflectivitats superiors a 40 dBZ només són un 31%, mentre que el 24% estan associats a reflectivitats inferiors a 30 dBZ.

C. DISCUSSIÓ

Característiques dels llamps

Així com les característiques de les descàrregues no són un bon mètode per distingir entre unes que siguin més o menys propícies a originar incendis, els resultats en relació a les tempestes sí que sembla que poden ser més útils. Els resultats més rellevants estan relacionats amb les condicions ambientals, com la temperatura i la humitat, i la reflectivitat i el moment de la tempesta en què es produeix la descàrrega, que en el fons ens estan indicant la quantitat d'aigua que acompanya la descàrrega. A continuació exposem la discussió dels resultats d'aquest treball i els comparem amb els d'altres treballs.

En relació a les característiques del llamp, els resultats coincideixen amb treballs anteriors (i.e. Larjavaara et al 2005; Hall i Brown 2006; Pineda et al 2014 i MacNamara et al 2020) que mostren que no hi ha diferència en la proporció de polaritats dels candidats més probables (CMP) i les climàtiques. En canvi, altres treballs sí que han trobat diferències en la polaritat de les descàrregues elèctriques causants de llamps i la de la població general. A més, aquestes diferències són disperses ja que, alguns resultats apunten que els llamps negatius són més freqüents en CMP (Flannigan i Wotton 1991); però d'altres resultats apunten al contrari i diuen que els llamps positius tenen més incidència en l'origen d'incendis (i.e. Latham i Williams 2001; McGuiney et al 2005 i Moris et al 2020). De fet, es barregen dos factors: els llamps positius presenten una major proporció de corrent continu (Saba et al 2006), i per tant és més probable que acabin generant un incendi. Per contra, representen només un 10% dels llamps. Així, considerant el conjunt de llamps, hi ha més incendis associats a llamps negatius que positius. Ara bé, si el que es busca és assignar una probabilitat d'incendi a cada llamp, aquesta ha de ser més alta en els llamps positius.

Pel que fa al corrent de pic de la descàrrega de retorn, tant per a llamps negatius com positius, aquest treball coincideix amb altres en què no s'han trobat diferències entre CMP i NT (i.e. Pineda et al 2014; Moris et al 2020).

En canvi, amb la multiplicitat, un dels altres *proxys* analitzats, sí que s'han trobat diferències. El nombre de descàrregues és més elevat en els CMP, especialment en les descàrregues negatives (1,7 descàrregues/llamp en NT i 2,9 en CMP). Aquests resultats coincideixen amb altres treballs (i.e. Fuquay et al 1967; Shindo i Uman 1989; Flannigan i Wotton 1991), però difereixen d'altres, com el de Larjavaara (2005) en què els resultats mostren una disminució de les probabilitats d'ignició a mesura que augmenta la multiplicitat; o d'altres treballs que no han trobat cap diferència (Pineda et al 2014 i MacNamara et al 2020).

Per tant, veient la disparitat de resultats i que sovint no s'han trobat diferències entre les característiques dels CMP i els NT, sembla que seria més interessant continuar l'estudi sobre les causes dels incendis de llamp analitzant altres variables que probablement hi estan més relacionades.

Distància

La distància entre el punt d'impacte del llamp que causa la ignició i l'origen registrat del foc hauria de ser, idealment, mínima. Com s'ha comentat, la localització assignada al llamp per la XDDE presenta una certa incertesa, a la que cal sumar-li, tot i que en menor grau, la que pugui tenir el registre de camp del punt d'origen de l'incendi. Juntament amb el temps, la distància és un dels dos factors que es fa servir per determinar quin llamp és el millor candidat.

Els resultats d'aquest treball han demostrat que, com era d'esperar, a mesura que ens apropem al punt registrat de la descàrrega del CMP, més incidència d'incendis hi ha; concretament el 94% dels CMP es produeixen a menys de 3 km de l'el·lipse. És a dir, els incendis comencen en punts propers a la descàrrega. Aquests resultats coincideixen amb els de Pineda et al (2014), tot i que en el treball actual s'han reduït una mica les distàncies. En la mateixa línia, Larjavaara (2005) va trobar que el 80% dels incendis de llamps se situava a menys de 5 km de les descàrregues causants de les ignicions.

Estacionalitat

En relació a l'estacionalitat, els resultats d'aquest treball són semblants als d'altres treballs (i.e. Pineda et al 2017 i Moris et al 2020) i mostren que els incendis de llamp ocorren principalment entre els mesos de març i novembre. A Castella i Lleó la majoria d'incendis de llamp tenen lloc entre els mesos de maig i setembre (Castedo-Dorado et al 2011 i Vecín-Arias et al 2016) i a Àustria, el 98% passen entre maig i agost (Müller 2013; Vacik i Müller 2017). De manera similar, als Estats Units el 91% dels incendis de llamp es registren entre els mesos d'abril i setembre (Ahrens 2013). Més concretament, a Califòrnia el 85% dels incendis de llamp ocorren entre juliol i setembre (Vankat 1985), i a Ontàrio tots els incendis es concentren entre maig i setembre, amb un pic al juny (Flannigan i Wotton 1991). A més, la gran majoria es concentren en els mesos d'estiu, que és quan fa més calor i l'ambient està més sec. Més concretament, segons els nostres resultats el 80% dels incendis de llamp tenen lloc entre juny, juliol i agost, un percentatge molt semblant a l'obtingut per Conedera (2006) als Alps, que és del 78%. També a Austràlia són als mesos de més calor quan es registren un major nombre d'incendis de llamp: el 97% es produeixen entre novembre i abril (Read et al 2018).

Aquesta marcada estacionalitat es pot relacionar amb dos factors: d'una banda, el règim de tempestes, que es concentren als mesos d'estiu i són testimonials entre novembre i març (Pineda et al 2011): si no hi ha llamps, no hi haurà ignicions ni focs de llamp. D'altra banda, l'estacionalitat encara és més marcada pels focs de llamp que per les tempestes: aquí entra el factor ambiental, ja que les altes temperatures, combinades amb la baixa humitat, afavoreixen que les ignicions causades pels llamps acabin en incendi.

Hora de l'eclosió i latència

L'eclosió dels incendis es produeix a les hores centrals del dia, amb el 56% dels casos originats entre les 12 T.U. i les 18 T.U. i només un 10% es produeix a la nit (21 T.U. a 6 T.U.). Aquests resultats són molt semblants a d'altres treballs que van trobar que el 40% de les eclosions es produeix entre les 14 T.U. i les 18 T.U. (Pineda et al 2014) o que un 50% entre les 12 T.U.

i les 19 T.U (Pineda et al 2017). Müller (2013) també va trobar que a Àustria el moment del dia amb més incendis de llamp és la mitja tarda i, als Estats Units, l'hora pic dels incendis de llamp és de 15 T.U. a 21 T.U. (Ahrens 2013).

Pel que fa la latència, el resultat d'aquest treball coincideix amb d'altres (Conedera 2006; Pineda et al 2014; 2017) que mostren que aquest temps entre la ignició i l'eclosió és menor durant les hores centrals del dia, en què les condicions ambientals són idònies pel desenvolupament de l'incendi a causa de les altes temperatures i la baixa humitat. En canvi, les ignicions que es produeixen al vespre, acostumen a quedar latents més hores i l'incendi no eclosiona fins la matinada o matí següents, quan les condicions tornen a ser més favorables (llamps adormits). A més, s'ha vist que més de la meitat d'incendis tenen una latència inferior a les 3 hores i que, a partir de les tres hores la distribució és força uniforme. Això no coincideix amb els resultats de Pineda et al (2014) que mostraven un comportament bimodal de la latència, amb un primer pic al voltant de 6 minuts i un segon a les 20 hores. Tot i això, ambdós estudis coincideixen en identificar dos grans grups: els llamps que eclosionen poc després de la caiguda del llamp (el 57% dels incendis comencen en les 3 primeres hores després de la descàrrega segons els nostres resultats i aproximadament un 25% segons Pineda et al 2014) i els llamps que generen una ignició que en el moment queda latent i que acaba eclosionant més endavant. Seria important poder caracteritzar aquests dos tipus de comportament, ja que a nivell de control de possibles llamps adormits i tasques d'extinció comporten una casuística força diferent.

La durada de les latències obtingudes en aquest treball coincideixen amb les trobades per Cesti et al (2005), que van des d'algunes hores a diversos dies. En canvi, no coincideixen amb les de Nash, i Johnson (1996); Wotton i Martell (2005) o Schultz et al (2019), els quals reporten un temps de latència més elevat, que sovint supera els 3 dies. Una possible explicació d'aquestes discrepàncies és el tipus de bosc. A diferència dels boscos mediterranis, als boscos boreals, les temperatures estivals són molt més suaus. Si bé el temps de latència depèn de diferents factors, creiem que el més rellevant és la temperatura. Tot i que caldria analitzar-ho en detall, les diferències entre les latències curtes al Mediterrani (Conedera et al 2006) i les latències de fins a setmanes registrades en boscos boreals d'Estats Units i el Canadà (Nash i Johnson 1996; Wotton i Martell 2005) estan bàsicament lligades a un llindar de temperatura (combinat amb baixes humitats relatives) que permet que el foc latent revifi i acabi generant un incendi.

Desplaçament de la tempesta

El desplaçament de la tempesta fa referència a la distància entre el primer i l'últim centroide, passant per cada un dels centroides registrats per l'algorisme de *tracking*. La majoria de tempestes (60%) se situen entre els 10 i els 45 km i molt poques superen distàncies superiors a 100 km. Aquest resultat sembla que es contradigui amb el que suggereix Larjavaara (2005), que diu que les descàrregues de tempestes que es desplacen 10 km o més, tenen menys probabilitat de causar una ignició o amb els de Hall (2008), que diu que dues tercers parts de les tempestes causants d'incendis es desplacen més de 50 km. Cal però tenir present, en aquestes comparacions entre estudis, l'aspecte geogràfic. Així l'estudi de Larjavaara (2005)

es centra a la regió escandinava, on les tempestes fan uns 188 km de mitjana (Tuovinen et al 2015).

Durada de la tempesta i moment de la descàrrega

Pel que fa la durada de les tempestes de llamp, la majoria (96%) dura menys de 3 hores i la mediana de les tempestes analitzades se situa als 66 minuts. Aquests valors són superiors als valors climàtics obtinguts per Galanaki et al (2018), que van trobar que, al Mediterrani, les tempestes de primavera, estiu i tardor duren al voltant dels 40, 35 i 45 minuts, respectivament. També són superiors als de Rigo i Llasat (2015), que van trobar que les tempestes a la zona de la plana de Lleida tenen una durada d'uns 41 minuts o als de Larjavaara (2005), que suggereix que la probabilitat d'ignició és inferior a la mitjana en tempestes que duren més de 40 minuts.

Si mirem en quin moment de la tempesta es produeix un major número de CMP (figura 7b), no trobem cap percentil amb una freqüència molt més elevada que els altres, però sí que es veu que hi ha més CMP al final de les tempestes i no a l'inici. Per tant, partint de la hipòtesi que els incendis de llamp són originats per descàrregues que es produeixen acompanyades de poca pluja, és a dir o a l'inici o al final, amb aquests resultats es veu com els CMP tenen lloc més aviat al final de les tempestes. Aquests resultats no coincideixen amb els de Hall (2008) que van trobar que el 93% de les ignicions es produeixen en el primer terç de les tempestes. Tampoc no coincideixen amb la distribució típica dels llamps durant el cicle de vida de la tempesta, que com es pot veure a la figura 10, als estadis finals de la tempesta les descàrregues NT disminueixen (Rigo et al 2008). Comparativament doncs, hi ha més llamps causants d'incendis en l'últim tram de la tempesta, quan, alhora, hi ha menys llamps: per tant els llamps d'aquest període tindran una major probabilitat de generar un incendi. Altres autors també han suggerit que la probabilitat d'ignició és més baixa en les fases centrals de les tempestes perquè és quan hi ha més precipitació i, per tant, tot i haver-hi més

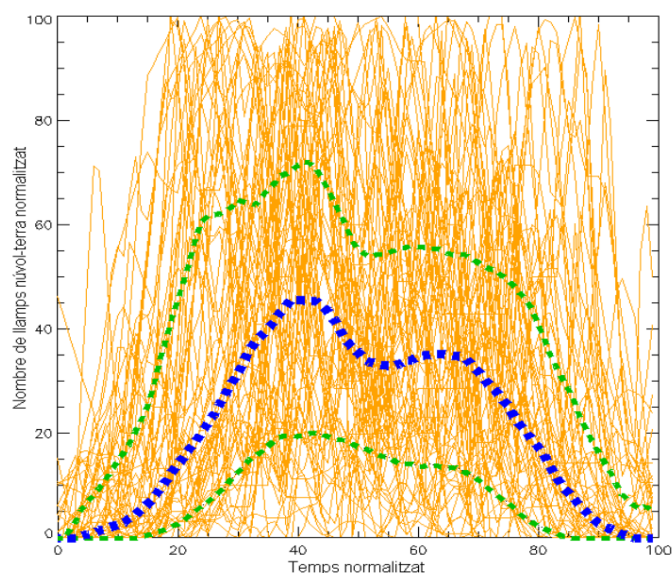


Figura 10. Evolució temporal de la densitat de descàrregues NT de les estructures convectives normalitzades respecte als valors màxims assolits (eix y) i respecte a la seva durada (eix x): cada línia taronja representa l'evolució temporal de la magnitud. També s'hi representen els percentils 25 i 75 (línies verdes) i percentil 50 (línia blava) per a un instant concret. Font: Rigo et al 2008.

descàrregues, la pluja no permet que s'arribi al punt d'ignició (i.e. Larjavaara 2005). Els nostres resultats mostren un pic de candidats a l'inici de la maduresa, que es podria correspondre amb el pic que es pot observar en el cicle de vida típic (Rigo et al 2008).

Velocitat de la tempesta

Sembla lògic pensar que, si una tempesta es desplaça molt ràpid, no donarà temps a què hi precipitin grans quantitats de pluja i, conseqüentment, els llamps tindran una major probabilitat de generar un incendi (Rorig i Ferguson 2002; Larjavaara 2005). Els valors obtinguts en aquest treball situen les tempestes que causen incendis de llamp en unes velocitats del voltant dels 36 km/h. Aquest valor és superior als obtinguts per Hall (2008), d'una velocitat mitjana de 23 km/h i una mediana de 15 km/h. Alhora, si comparem amb la població de tempestes general, Galanaki et al (2018) a partir de dades climàtiques sobre tempestes d'estiu a la regió mediterrània, va trobar que la velocitat mitjana és de 7 km/h. Amb tot, faltaria poder comparar aquests resultats amb un valor climàtic a la zona d'estudi.

Reflectivitat

Per últim, aquest treball també ha volgut analitzar els valors de reflectivitats del moment de la descàrrega, amb la hipòtesi que valors baixos haurien de tenir una probabilitat més alta de causar un incendi, ja que van acompanyats de pluges menys intenses. Els nostres resultats confirmen aquesta hipòtesi ja que el 58% de CMP descarreguen en zones de la tempesta on la reflectivitat no assoleix els 35 dBZ. Aquests resultats coincideixen amb els de Hall (2008), que va trobar que el 65% dels llamps que produeixen una ignició se situen per sota dels 35 dBZ. A més a més, també va observar que la majoria de les descàrregues es produïen als marges de la tempesta, un fenomen que també hem observat en analitzar visualment les imatges i que seria interessant investigar més detalladament.

III. CONCLUSIONS

Aquest treball ha servit per reafirmar que les característiques dels llamps no són una bona solució per assignar-los una probabilitat d'incendi i així facilitar les tasques de control i extinció al SPIF o bombers.

En canvi, s'ha vist, que hi ha altres condicionants que poden ser més útils per assignar-los una probabilitat. Els resultats més rellevants estan relacionats amb diferents variables de les tempestes estretament lligades amb la quantitat de precipitació associada. Les tempestes amb més CMP són tempestes ràpides, que no permeten que hi hagi una acumulació d'aigua elevada que pugui apagar les possibles ignicions. A més, les descàrregues amb més probabilitat de generar un incendi tenen lloc en els moments finals de les tempestes. Aquí passa com amb la velocitat: el fet que la tempesta finalitzi fa que no precipiti més aigua al punt on hagi pogut produir-se una ignició i l'apagui i, per tant, s'hi pot desencadenar un incendi. Alhora, els valors de reflectivitat associats als CMP són inferiors als dels NT, la qual cosa també suggereix que els CMP van acompanyats d'intensitats de precipitació més baixes.

També s'ha vist que l'època de l'any i l'hora del dia són factors que juguen un paper molt important en l'eclosió dels incendis de llamp a causa de les diferències de temperatura i humitat relativa.

Amb aquest treball s'ha comprovat, doncs, la complexitat que hi ha darrere l'ocurrència d'aquests incendis, ja que no hi ha un únic factor que en determini la seva generació, sinó que és deuen al conjunt de molts factors. Per això seria interessant aprofundir en alguns d'aquests factors més determinants, com la precipitació, i analitzar-ne d'altres que no s'han pogut incloure en aquests treball però que hi juguen un paper molt rellevant, com són la temperatura i la humitat relativa.

AGRAÏMENTS

Vull agrair al meu tutor, en Joan Bech, els seus suggeriments i propostes per millorar aquest treball. També vull donar les gràcies a la cinquena planta del SMC (Nicolau Pineda, Helen San Segundo, Patricia Altube, Ferran Fabró, Tomeu Rigo i Enric Casellas) per la seva ajuda i per haver-me fet sentir tan a gust al SMC. I, sobretot, agrair al Nico les ganes, les bones idees, l'esforç i les hores dedicades a aquest treball perquè sense ell aquest TFM no hagués estat possible.

REFERÈNCIES

- Ahrens, M., 2013. Lightning fires and lightning strikes. National Fire Protection Association: Fire Analysis and Research Division. Quincy, MA, 1-31.
- Basarab, B. M., S. A. Rutledge, and B. R. Fuchs, 2015. An improved lightning flash rate parameterization developed from Colorado DC3 thunderstorm data for use in cloud-resolving chemical transport models, *J. Geophys. Res. Atmos.*, 120, 9481–9499.
- Castedo-Dorado, F., Rodríguez-Pérez, J.R., Marcos-Menéndez, J.L., Álvarez-Taboada, M.F., 2011. Modelling the probability of lightning-induced forest fire occurrence in the province of León (NW Spain) *Forest Systems* 2011 20 (1), 95-107.
- Cesti, G., Conedera, M., Spinedi, F., 2005. Considerazioni sugli incendi boschivi causati da fulmini. *Rivista forestale svizzera*, 156, 9: 353–361.
- Conedera, M., Cesti, G., Pezzatti, T., Zumbrunnen, F. Spinedi, F., 2006. Lightning-induced fires in the Alpine region: An increasing problema. *Forest Eco. Man.*, 234.
- Cummins, K.L., Murphy, M.J., 2009. An overview of lightning locating systems: history, techniques, and data uses, with an in-depth look at the U.S. *Trans. Electromagn. Compat.* 51, 499–518.
- Dowdy, A.J., Mills, G.A., 2012. Atmospheric and Fuel Moisture Characteristics Associated with Lightning-Attributed Fires. *J. Appl. Meteorol.* 51, 2025–2037.
- Ferro, M.A., Saba, M.M.F., Pinto Jr., O., 2009. Continuing current in multiple channel cloud-to-ground lightning. *Atmos. Res.* 91, 399–403.
- Flannigan, M.D., Wotton, B.M., 1991. Lightning-ignited forest fires in northwestern Ontario. *Can. J. For. Res.* 21, 277–287.
- Fuquay, D. M., R. G. Baughman, A. R. Taylor, and R. G. Hawe 1967. Characteristics of seven lightning discharges that caused forest fires, *J. Geophys. Res.*, 72, 6371–6373.
- Galanaki, E., Lagouvardos, K., Flaounas, E., Argiriou, A., 2018. Thunderstorm climatology in the Mediterranean using cloud-to-ground lightning observations. *Atm. Res.*, 207, 136-144.

- Generalitat de Catalunya, 2020. Departament de Medi Ambient i Habitatge, Direcció General del Medi Natural Servei de Prevenció d'Incendis Forestals. Estadístiques d'incendis forestals.
- Granström, A., 1993. Spatial and temporal variation in lightning ignitions in Sweden. *J. Veg. Sci.* 4, 737–744.
- Hall, B.L., 2008. Fire ignitions related to radar reflectivity patterns in Arizona and New Mexico. *Int. J. Wildland Fire* 17, 317–327.
- Hall, B.L., Brown, T.J., 2006. Climatology of positive polarity flashes and multiplicity and their relation to natural wildfire ignitions. In: *Proceedings of the 19th International Lightning Detection Conference*, Tucson, Arizona, April 24–25.
- Idescat, 2020. Anuari estadístic de Catalunya: Usos del sòl i superfície. Institut Estadístic de Catalunya. Última consulta: 07/04/2020. Disponible a: <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&tema=terri&n=165>
- Keränen, J., 1929. Blitzschlag als Zünder der waldbrände im nördlichen finnland (ingerman). *Acta Forestalia Fennica* 34, 25.
- Kitterman, C. G., 1980. Characteristics of lightning from frontal system thunderstorms. *J. Geophys. Res.*, 85 (C10), 5503–5505.
- Larjavaara, M., 2005. Climate and Forest Fires in Finland– Influence of Lightning-Caused Ignitions and Fuel Moisture. Doctoral Thesis. Department of Forest Ecology, Faculty of Agriculture and Forestry, University of Helsinki.
- Larjavaara, M., Pennanen, J., Tuomi, T., 2005. Lightning that ignites forest fires in Finland. *Agric. For. Meteorol.* 132, 171–180.
- Latham, D., Williams, E., 2001. Lightning and forest fires. In: *Forest Fires: Behavior and Ecological Effects*. Academic Press, 375–418.
- Latham, D.J., Schlieter, J.A., 1989. Ignition Probabilities of Wildland Fuels Based on Simulated Lightning Discharges. *USDA For. Serv. Intermt. Res. Stn. Res. Pap. INT-411*. Ogden, UT.
- Macnamara, B.R., Schultz, C.J., Fuelberg, H.E., 2020. Flash Characteristics and Precipitation Metrics of Western U.S. Lightning-Initiated Wildfires from 2017. *Fire*, 3, 5.
- Martín-Vide, J., Brunet, M., Prohom, M., Rius, A., 2010. Els climes de Catalunya. Present i tendències recents. Segon informe sobre el canvi climàtic a Catalunya, 39-72, Barcelona.
- McGuiney, E., Shulski, M., Wendler, G., 2005. Alaska lightning climatology and application to wildfire science, Conference on Meteorological Applications of Lightning Data. 85th AMS Annual Meeting. San Diego, CA.
- Montanyà, J., Pineda, N., March, V., Illa, A., Romero, D., Solà, G., 2006. Experimental evaluation of the catalan lightning detection network. In: *19th International Lightning Detection Conference*, Tucson Vaisala (7p.).
- Moris, J.V., Conedera, M., Nisi, L., Bernardi, M., Cesti, G., Pezzati, G.B., 2020. Lightning-caused fires in the Alps: Identifying the igniting strokes. *Agric. For. Meteorol.* 290.
- Müller, M.M., Vacik, H., Diendorfer, G., 2013. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. *Theor Appl Climatol* 111, 183–193.
- Nash, C.H., Johnson, E.A., 1996. Synoptic climatology of lightning-caused forest fires in subalpine and boreal forests. *Canadian J. of For. Res.* 26: 1859-1874.
- Pineda, N., Montanyà, J., van der Velde, O.A., 2014. Characteristics of lightning related to wildfire ignitions in Catalonia. *Atmos. Res* 135–136, 380–387.
- Pineda, N., Rigo, T., 2017. The rainfall factor in lightning-ignited wildfires in Catalonia. *Agric. For. Meteorol.*, 239, 249–263.
- Pineda, N., Vilaclara, E., Soler, X., 2011. Aproximació a la climatologia de llamps a Catalunya. Nota d'estudi del SMC (nº 73), Barcelona, 5-56.
- Rakov, V.A., Uman, M.A., 2003. *Lightning: Physics and Effects*. Cambridge University Press, UK, 687p.
- Read, N., Duff, T.J., Taylor, P.G., 2018. A lightning-caused wildfire ignition forecasting model for operational use. *Agric. For. Meteorol.*, 253-254, 233–246.
- Rigo, T., Llasat, M.C., 2015. Forecasting hailfall using parameters for convective cells identified by radar. *Atm. Res.*, 169, 366-376.
- Rigo, T., Pineda, N., Bech, J., 2008. Estudi i modelització del cicle de vida de les tempestes amb tècniques de teledetecció. Nota d'estudi del SMC (nº 72). Barcelona, 23-44.
- Rigo, T., Pineda, N., Bech, J., 2010. Analysis of warm season thunderstorms using an object-oriented tracking method based on radar and total lightning data. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 10, 1881–1893.
- Rorig, M.L., Ferguson, S.A., 2002. The 2000 fire season: lightning-caused fires. *J. Appl. Meteorol.* 41, 786–791.
- Saba, M.M.F., Ballarotti, M.G., Pinto Jr., O., 2006. Negative cloud-to-ground lightning properties from high-speed video observations. *J. Geophys. Res.* 111, D03101.
- Saba, M.M.F., Schulz, W., Warner, T.A., Campos, L.Z.S., Schumann, C., Krider, E.P., Cummins, K.L., Orville, R.E., 2010. High-speed video observations of positive lightning flashes to ground. *J. Geophys. Res.* 115, D24201.
- Salvador, A., Pineda, N., Montanyà, J., Solà, G., 2020. Seasonal variations on the conditions required for the lightning production. *Atm. Res.*, 243.
- San-Miguel-Ayanz, J., Durrant, T., Boca, R., Liberta, G., Branco, A., De Rigo, D., Ferrari, D., Maianti, P., Artes Vivancos, T., Pfeiffer, H., Löffler, P., Nuijten, D., Leray, T. and Jacome Felix Oom, D., *Forest Fires in Europe, Middle East and North Africa 2018*, Publications Office of the EU, Luxembourg, 2019.
- Schultz, C., Nauslar, N.J., Wachter, J.B., Hain, C.R., Beli, J.R., 2019. Spatial, Temporal and Electrical Characteristics of Lightning in Reported Lightning-Initiated Wildfire Events. *Fire*, 2, 18.
- Shindo, T., Uman, M.A., 1989. Continuing current in negative cloud-to-ground lightning. *J. Geophys. Res.* 94, (D4), 5189–5198.
- Tuovinen, J.P., Rauhala, J., Schultz, D.M., 2015. Significant-Hail-Producing Storms in Finland: Convective-Storm Environment and Mode. *American Meteorological Society*. 30(4).
- Uman, M., 1987. *The lightning Discharge*. International Geophysics series, vol. 39. Academic Press.
- Vacik, H., Müller, M.M., 2017. Characteristics of lightnings igniting forest fires in Austria. *Agric. For. Meteorol.* 240-241, 26-36.
- Vankat, J.L., 1985. General patterns of lightning ignitions in Sequoia National Park, California. General Technical Report INT-182, USDA Forest Service Intermountain Forest and Range Experiment Station., 408-411.
- Vecín-Arias, D., Castedo-Dorado, F., Ordóñez, C., Rodríguez-Pérez, J.R., 2016. Biophysical and lightning characteristics drive lightning-induced fire occurrence in the central plateau of the Iberian Peninsula. *Agric. For. Meteorol.* 225, 36–47.
- Wotton, B.M., Martell, D.L., 2005. A lightning fire occurrence model for Ontario. *Can. J. For. Res.* 35, 1389–1401.

ANNEX

Taula I. Multiplicitat, polaritat i corrent de pic dels llamps NT (2010-2019) i els CMP d'aquest estudi.

	NT	CMP
Mitjana multiplicitat negatius	1,7	2,9
Mitjana multiplicitat positius	1,3	1,9
Descàrregues múltiples negatius (%)	41,0	61,4
Descàrregues múltiples positius (%)	24,0	43,0
Llamps polaritat negatius (%)	85,0	77,0
Llamps polaritat positius (%)	15,0	23,0
Mitjana corrent de pic negatius (kA)	-16,6	-17,7
Mitjana corrent de pic positius (kA)	33,4	23,6
Mediana corrent de pic negatius (kA)	-11,6	-12,8
Mediana corrent de pic positius (kA)	20,3	13,3
Percentil 75 corrent de pic negatius (kA)	-18,0	-20,8
Percentil 75 corrent de pic positius (kA)	43,0	36,0
Percentil 95 corrent de pic negatius (kA)	-44,5	-45,4
Percentil 95 corrent de pic positius (kA)	96,0	73,9
Màxim corrent de pic negatius (kA)	-498,4	-130,6
Màxim corrent de pic positius (kA)	483,6	116,7
Mida mostra	286.686	371

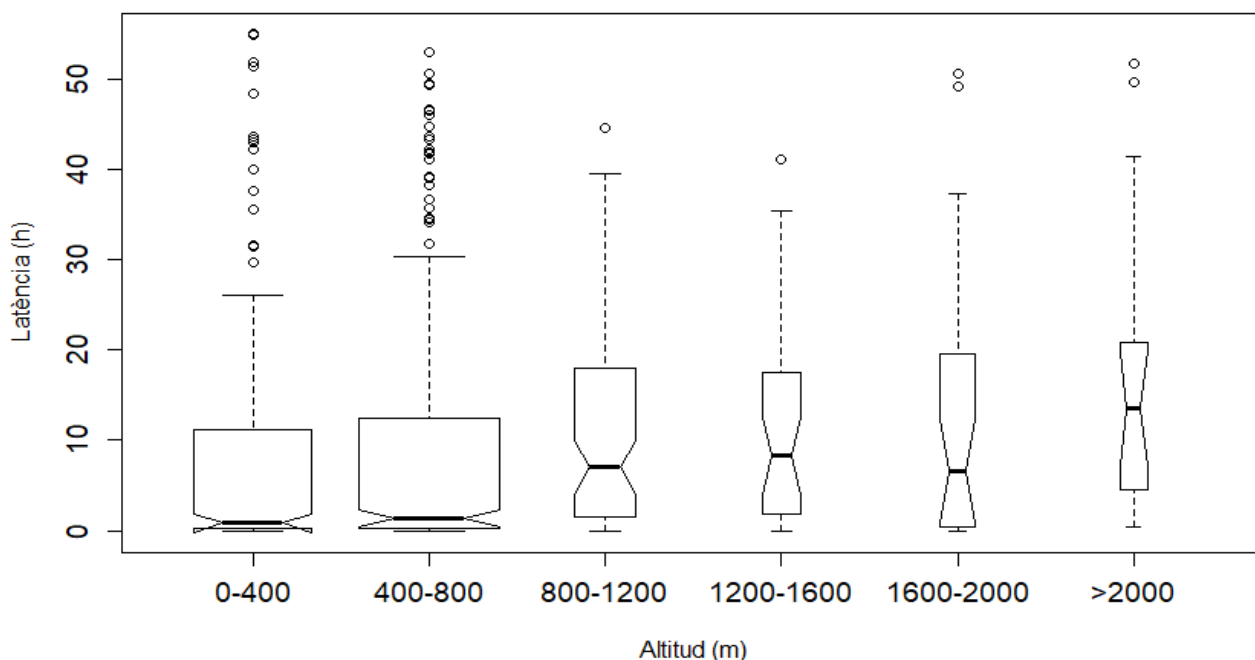


Figura I. Boxplots del temps de latència segons l'altitud de l'incendi. L'amplada dels boxplots és proporcional a la mida de la mostra.

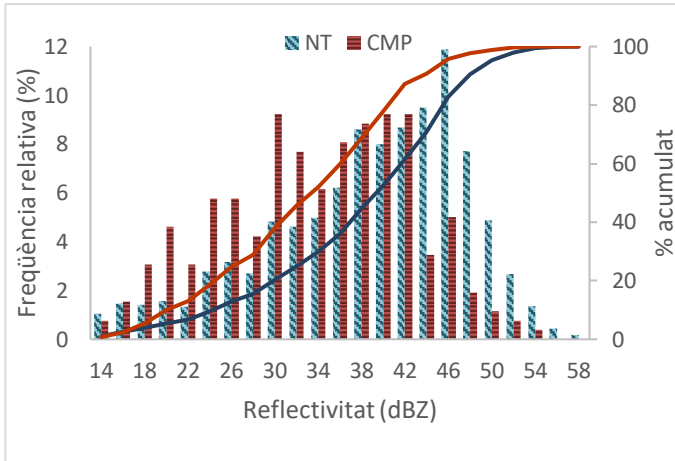


Figura II. Distribució de la reflectivitat del CAPPI 1 km associada als NT i els CMP de les tempestes causants d'incendis de llamp.

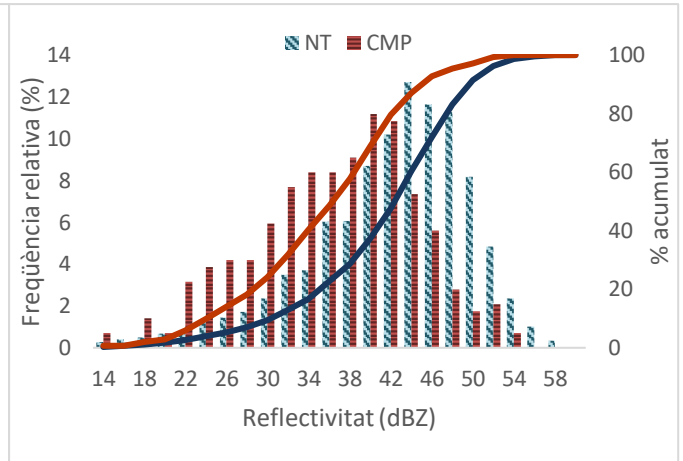


Figura III. Distribució de la reflectivitat màxima associada als NT i els CMP de les tempestes causants d'incendis de llamp.