



**Universitat de les  
Illes Balears**

Facultat de Filosofia i Lletres

**Memòria del Treball de Fi de Grau**

# Causes i factors en la propagació d'un incendi: el cas de l'incendi del Port de Pollença el 27 de desembre de 2017.

Joan Llobera Cerdà

**Grau en Geografia**

Any acadèmic 2017 - 2018

DNI de l'alumne: 41574106L

Treball tutelat per Enrique Morán Tejeda

Departament de Geografia

S'autoritza la Universitat a incloure aquest treball en el Repositori Institucional per a la seva consulta en accés obert i difusió en línia, amb finalitats exclusivament acadèmiques i d'investigació	Autor		Tutor	
	Sí	No	Sí	No
	X		X	

***Paraules clau del treball:***

*Incendis forestals, condicions climàtiques, factors meteorològics, teledetecció, estat de la vegetació, estrés hídric de la vegetació.*



## ÍNDEX

1.	LLISTA DE FIGURES .....	1
2.	LLISTA DE TAULES .....	1
3.	LLISTA D'ACRÒNIMS .....	1
4.	RESUM.....	2
5.	ABSTRACT.....	2
6.	INTRODUCCIÓ.....	3
6.1.	<i>Problemàtica general sobre els incendis.....</i>	3
6.2.	<i>Factors meteorològics propensos a un incendi.....</i>	4
6.2.1.	<i>La pressió atmosfèrica.....</i>	4
6.2.2.	<i>Situacions d'instabilitat atmosfèrica .....</i>	5
6.2.3.	<i>La temperatura .....</i>	5
6.2.4.	<i>La humitat relativa .....</i>	6
6.2.5.	<i>El vent .....</i>	6
6.3.	<i>Els incendis a Mallorca .....</i>	7
6.4.	<i>El clima a Mallorca.....</i>	8
7.	HIPÒTESIS I OBJECTIUS .....	9
8.	METODOLOGIA .....	10
8.1.	<i>Obtenció de les dades .....</i>	10
8.2.	<i>Tractament previ de les imatges satèl·lit.....</i>	10
8.3.	<i>Delimitació de l'àrea cremada (NBR) .....</i>	12
8.4.	<i>Càlcul del NDVI .....</i>	13
8.5.	<i>Càlcul del MSI .....</i>	14
8.6.	<i>Índex normalitzat de precipitació – evapotranspiració (SPEI) .....</i>	14
8.7.	<i>Pressió atmosfèrica i Vertical Total Index.....</i>	15
9.	ÀREA D'ESTUDI.....	16
10.	RESULTATS I DISCUSSIÓ.....	17
10.1.	<i>Anàlisi de l'índex normalitzat de precipitació - evapotranspiració (SPEI)...</i>	17
10.2.	<i>Anàlisi de l'estat de la vegetació (NDVI).....</i>	18
10.3.	<i>Anàlisi de l'estrés hídric de la vegetació (MSI) .....</i>	20
10.4.	<i>Anàlisi meteorològic del mes i del moment que va ocórrer l'incendi .....</i>	22
10.5.	<i>Reptes del futur.....</i>	26
11.	CONCLUSIONS.....	28
12.	AGRAÏMENTS .....	29
13.	BIBLIOGRAFIA .....	30
14.	FONTS ELECTRÒNIQUES.....	33



## **1. LLISTA DE FIGURES**

- **Figura 1.** Evolució del nombre de sinistres i de la superfície forestal cremada a Mallorca entre el període de 2008 – 2017.
- **Figura 2.** Principals causes dels incendis produïts a Mallorca al 2017.
- **Figura 3.** Climograma de Mallorca amb les temperatures i precipitacions mitjanes des del 1977 al 2014.
- **Figura 4.** Zona d'estudi mitjançant l'eina NBR.
- **Figura 5.** SPEI de Mallorca a una escala temporal acumulada de 12 mesos.
- **Figura 6.** NDVI dels anys 2009, 2017 i 2018
- **Figura 7.** Histograma sobre l'estat de la vegetació dels distints períodes d'estudi segons el NDVI.
- **Figura 8.** Estrés hídric (MSI) dels anys 2009, 2017 i 2018.
- **Figura 9.** Histograma sobre l'estrés hídric (MSI) dels distints períodes d'estudi.
- **Figura 10.** Pressió atmosfèrica (hPa) durant el dia de l'incendi.
- **Figura 11.** Inestabilitat atmosfèrica (Vertical Total Índex) del dia de l'incendi.
- **Figura 12.** Dades meteorològiques ( humitat relativa, mitjana de la velocitat del vent, velocitat màxima del vent, pressió atmosfèrica) del mes de desembre de 2017. La línia indica el moment en què es va produir l'incendi.
- **Figura 13.** Rosa dels vents del mes de desembre de 2017.
- **Figura 14.** Zona d'estudi presa a través d'una avioneta el dia 2/02/2018. Font: Pau Bennassar Llinàs, pilot aficionat.

## **2. LLISTA DE TAULES**

- **Taula 1.** Mitjana sobre les dades meteorològiques del mes de desembre de 2017.
- **Taula 2.** Mitjana sobre les dades meteorològiques del moment de l' incendi (19 – 21 h).

## **3. LLISTA D'ACRÒNIMS**

- AEMET – *Agència Estatal de Meteorologia*
- IBANAT – *institut Balear de la Natura*
- LIC – *Lloc d'Interès Comunitari*
- MSI - *Moisture Stress Index*
- NBR – *Normalized Burn Ratio*
- NCEP – NCAR - *National Center for Environmental Prediction i National Center for Atmospheric Research*
- ND – *Nivells Digitals*
- NDVI – *Normalized Differenced Vegetation Index*
- OMM – *Organització Mundial de Meteorologia*
- SPEI - *Standardised precipitation-evapotranspiration index*
- USGS - *United States Geological Survey*
- ZEPA - *Zones d'Especial Protecció per a les Aus*

#### **4. RESUM**

Donada la importància dels impactes ambientals que produeixen cada any els incendis forestals en la regió del Mediterrani, el present treball de final de grau té com a objectiu l'estudi de les causes i els factors en la propagació d'un incendi que va ocórrer en el coll de Siller el passat 27 de desembre de 2017 al Port de Pollença. La causa de l'incendi va ser accidental. Per això, mitjançant l'anàlisi de les condicions climàtiques i meteorològiques, es pretén observar com aquestes han propiciat la propagació d'aquest esdeveniment. D'altra banda, a través de la teledetecció, es pretén quantificar la severitat i l'àrea cremada juntament amb l'evolució i/o canvi espai – temporal de l'estat de la vegetació i l'estrés hídric de les plantes i del sòl. Tot això comparant en distintes escales temporals per corroborar les condicions climàtiques a les que està sotmesa la zona d'estudi. D'aquesta manera, els resultats indiquen que la sequera, la qual està sotmesa les Illes Balears des dels darrers anys marcada a través de l'índex normalitzat de precipitació - evapotranspiració, juntament amb les condicions meteorològiques del mes de desembre i del moment en que es va produir l'incendi, han estat els factors crucials en la seva propagació. Finalment es proposen certes mesures i reptes pel futur, per prevenir que es produeixin més incendis dins aquesta zona d'estudi.

#### **5. ABSTRACT**

Given the importance of the environmental impacts related to wildfires in the Mediterranean region, this study aims to study investigate the causes and factors in the spread of a wildfire that occurred on Decemb.er 27<sup>th</sup>, 2017 in the “coll de Siller”, Port of Pollença. The cause of the fire was accidental. For that reason, by means of the analysis of the climatic and meteorological conditions, we aim to observe how they contributed to the spread of such event. On the other hand, by means of remote sensing, we intended to quantify the severity and extension of the burned area along with the spatio - temporal change or evolution of the state of vegetation and water stress of the plants and the soil. The analysis of different time scales helped corroborating the climatic conditions to which the vegetation is subject in the study zone. In this way, the results indicate that the drought, which is subject to the Balearic Islands since recent years, marked through the standardised index of precipitation – evapotranspiration, together with the meteorological conditions of the month of December and the time when the fire occurred, it have been the crucial factors in the spread of this fire. Finally, certain measures and challenges for the future are proposed to prevent more fires from occurring in this study area.

## 6. INTRODUCCIÓ

### 6.1. Problemàtica general sobre els incendis

El foc i la conca del Mediterrani sempre han tingut una estreta relació. Encara que els incendis forestals siguin des de sempre un factor natural propi dels ecosistemes mediterranis, en els darrers anys, hi ha hagut un augment exponencial en la freqüència d'incendis (Domenech, 2015). De fet, molts d'aquests incendis forestals adquireixen grans dimensions, impossibilitant el mètode d'extinció actuals i la capacitat de l'ecosistema per poder regenerar-se. Per això, si es té en compte les condicions adverses que afecten totes les regions amb predominança del clima mediterrani, es pot demostrar com els incendis han vingut succeint des de l'antiguitat. No obstant, en produir-se aquestes irregularitats en el clima mediterrani, en els darrers anys s'han produït un alarmant increment en el nombre d'incendis forestals i de superfície cremada, amb una gran sinistralitat. (García – Mares & Calabuig, 1990).

Per altra banda, l'home té una forta responsabilitat en els incendis. S'estima que prop del 96% dels incendis a Espanya són intencionats. En canvi, el 4% restant es deu a causes naturals com per exemple raigs. Actualment, la problemàtica del foc a la conca del mediterrani ha adquirit una calamitat en els ecosistemes naturals. Els principals fets que han provocat aquesta situació són (Pascuas, 2004):

- La irregularitat del clima mediterrani.
- Un augment de la superfície arbrada i arbustiva.
- La davallada de la població rural i l'abandonament de bona part de les activitats agràries, ramaderes i forestals.
- El factor Home, ja sigui intencionat o negligència i/o accidental.

Per poder exemplificar més amb el davallament de la població rural s'ha de destacar que a dia d'avui, degut al canvi socioeconòmic, ha augmentat més la població, (especialment a la zona d'interfície urbà – forestal). D'aquesta manera, la pressió turística en el Mediterrani, ha dut a un augment del nombre de residències turístiques a les zones rurals (Pausas, 2004). A tot això se li ha de sumar dues causes més. Per una banda, la inadequada política forestal que fomenta les repoblacions mono específiques, contínues i denses, amb espècies com els pins (*Pinus halepensis*), que, en general, són més fàcilment inflamables que altres boscs amb espècies propis de la zona. D'altra banda, els conflictes o el paper "accidental/involuntari" de visitants a zones forestals, en el qual ignoren els riscos que pot dur fer foc.

Malgrat això, els desequilibris en els factors meteorològics propis del clima mediterrani, són una de les vertaderes causes en la propagació d'incendis forestals. D'aquesta forma, mitjançant l'aplicació de les tècniques de Teledetecció espacial a l'estudi dels incendis forestals a partir d'imatges Landsat, es pot proporcionar tota mena d'informació prèvia, durant i posterior a l'incendi.

Respecte a la informació prèvia i posterior a l'incendi, les aplicacions que es poden dur a terme a partir de la teledetecció són: cartografiar el tipus de combustible, avaluació del risc d'incendi, determinar el començament de l'època de perill, àrees cremades, estat de la vegetació, etc. A més, durant el desenvolupament de l'incendi es pot proporcionar informació sobre la localització del focus actiu mitjançant sensors tèrmics (Delgado Hernández, 2000).

Finalment, la informació posterior a l'incendi fa referència a l'avaluació de la superfície realment afectada i al seguiment d'àrees incendiades al llarg del temps, on en els darrers anys, gràcies al satèl·lit Landsat 8, s'han donat bons resultats en els aspectes relatius a la delimitació del perímetre dels incendis i a l'avaluació precisa de les superfícies afectades.

## **6.2. Factors meteorològics propensos a un incendi**

La meteorologia és la principal força que dirigeix els canvis en el comportament d'un incendi (Garcia de Pedraza et al 1987). Per tant, tenir en compte els canvis meteorològics i les seves dinàmiques ajuden a conèixer les causes en la propagació d'un incendi forestal.

L'atmosfera de la Terra és molt dinàmica. D'aquesta forma, comprendre els paràmetres meteorològics actuals i els pronòstics, ens ajudaran a veure quin serà el comportament d'un incendi. Així doncs, si es coneixen les variables meteorològiques com la temperatura, la pressió atmosfèrica, la humitat relativa, la precipitació o el vent ens poden ajudar a comprendre l'esquema general de la propagació d'un incendi.

Les masses d'aire es desplacen i circulen contínuament al voltant de la Terra. Aquest fenomen també es produeix durant un incendi, encara que sigui a menor escala. Per això, moments previs a un incendi i durant tot el procés d'extinció es produeixen canvis meteorològics, en els quals la principal feina consisteix a detectar aquests canvis i combatre'ls.

### **6.2.1. La pressió atmosfèrica**

A causa de l'escalfament diferencial i la rotació de la superfície de la Terra, l'aire tendeix a acumular-se a determinades zones. Un cop les forces han creat aquestes acumulacions, es redueixen i l'aire tendeix a moure's des de les zones de major acumulació a les de menor acumulació. Per poder mesurar aquestes acumulacions s'empra el pes de la columna d'aire sobre la superfície terrestre. Aquest pes es denomina pressió atmosfèrica. La pressió estàndard o normal a nivell del mar és de 1013 hPa (Zuñiga & Crespo del Arco, 2010). Així doncs, aquesta pressió atmosfèrica varia segons l'altura. Per tant, a major altura, menor serà la pressió atmosfèrica.

Generalment, els moviments atmosfèrics venen dominats per grans acumulacions d'aire envoltats per zones de poca acumulació d'aire, els quals s'anomenen centres d'acció. Els centres d'acció que presenten altes pressions (> 1013 hPa a nivell del mar) es denominen anticiclons. Mentre que, una depressió presenta unes pressions inferiors a 1013 hPa (Mauro, 1999).

Aquests mateixos moviments verticals de l'aire associats entre les altes i les baixes pressions també ocorren durant un incendi. Simplement la columna de fum actua com una cel·la de baixes pressions a petita escala, l'aire entrant convergeix en el centre i ascendeix des de la superfície. Llavors, a ambdós llocs de la columna es formen àrees de altes pressions, on l'aire descendeix i divergeix cap al foc. Per això, les baixes pressions tendeixen a favorir la propagació dels incendis, mentre les altes pressions se considera com un inhibidor de la seva propagació (Sánchez - Laulhé, 2015).



### **6.2.2. Situacions d'instabilitat atmosfèrica**

Les condicions d'estabilitat atmosfèrica poden canviar contínuament a causa de les variacions de les temperatures i de la circulació de l'aire a la part inferior i superior de l'atmosfera.

Una atmosfera inestable es produeix quan la temperatura descendeix en altura a un ritme major que el refredament adiabàtic sec ( $9.8^{\circ}/\text{km}$ ), permetent que l'aire es desplaci cap a altituds elevades (Davison & Gálvez, 2016). Normalment, si la temperatura de l'aire que s'eleva és més alta que l'aire que l'envolta, l'aire continuarà elevant-se. Per tant, a mesura que l'aire puja i es refreda, la seva humitat pot dur que es condensi i formi núvols. D'aquesta manera, es produeix instabilitat atmosfèrica quan el gradient adiabàtic sec és menor que el gradient vertical de temperatura ( $GAS < GVT$ ). Això significa que la temperatura d'una massa d'aire ascendent disminueix més lent que la temperatura de l'aire circumdant immòbil. Així, la massa d'aire pot continuar en ascens (Domínguez Martín, 2008).

D'aquesta forma, en funció de l'energia necessària perquè una partícula ascendeixi, aquesta resistència pot ser major o menor. Per tant, depenent de l'estabilitat o instabilitat, l'aire pot pujar, baixar o quedar-se a la mateixa altura. Així, l'aire estable es resisteix als moviments verticals, mentre l'aire inestable incita a realitzar aquests moviments verticals. Com a conseqüència, si la disminució de la temperatura és major a  $1^{\circ}\text{C}$  per cada 100 metres, l'aire tendeix a ser inestable i es produirà un moviment vertical de l'aire (Fernández, 1996).

Llavors, si el gradient tèrmic és superior al valor sec adiabàtic, l'aire es desplaça cap a dalt, amb una temperatura superior, afavorint així la creació de grans columnes convectives sobre els incendis. En aquest cas, s'afavoreix la re – alimentació i la propagació, ja que el foc genera convecció en vertical i el buit resultant és reemplaçat per aire, és a dir, per oxigen, el qual procedeix de les zones circumdants. Si a tot això se li suma el pendent on es produeix, afavoreix la generació de vent topogràfic i potencia la magnitud del incendi.

De forma contrària, en situacions de estabilitat atmosfèrica, on els moviments verticals de l'aire queden inhibits, la propagació del incendi es complica, ja que el fum no tindrà la sortida vertical. Per això no es produirà l'entrada horitzontal de l'aire i s'acabarà ofegant el foc (Domínguez Martín, 2008).

### **6.2.3. La temperatura**

La temperatura es defineix com la magnitud física que expressa el grau o nivell de calor dels cossos o de l'ambient, mesurat a una escala determinada (Zuñiga & Crespo del Arco, 2010). Els principals factors que influeixen en els canvis de temperatura i, com a conseqüència en la propagació d'un incendi, són (García de Pedraza, & García Vega, 1987):

- La quantitat d'humitat i/o contaminació de l'aire.
- L'angle entre la superfície terrestre i el Sol.
- El temps que transcorre entre la incidència de la radiació solar sobre la superfície i el moment en què torna a irradiar aquesta energia cap a l'espai.
- Les propietats de la superfície del terreny o la vegetació. És a dir, color, textura, transparència, conductivitat, calor absorbit i humitat superficial.

Aleshores, els canvis en la temperatura ocasionen un increment de l'energia disponible perquè es produeixi la ignició d'un incendi. D'altra banda, també provoquen canvis amb la evapotranspiració i augmenta l'estrés hídric de les plantes, sent així més vulnerables davant un incendi.

#### **6.2.4. La humitat relativa**

La humitat relativa és el contingut d'aigua de l'atmosfera en relació a l'atmosfera saturada. A cada temperatura li correspon una determinada quantitat de vapor d'aigua necessària per dur a terme la saturació. L'aire calent pot contenir més vapor d'aigua que l'aire fred, per tant, la humitat relativa serà menor. Per aquest motiu, a mesura que s'augmenta la temperatura durant el dia la humitat relativa disminueix (Zuñiga & Crespo del Arco, 2010). Sovint, durant la nit és més normal que els incendis es propaguin més lentament, ja que els combustibles absorbeixen la humitat de l'aire.

No obstant això, la topografia, l'altura, la vegetació i el vent poden ocasionar canvis en la humitat relativa. Destacant el vent, durant la nit aquest tendeix a pujar la temperatura de l'aire i a baixar la humitat relativa prop del sòl. Per això, el vent bloqueja, redueix al mínim el refredament per radiació del terreny i mescla l'aire en altura càlid i més sec amb l'aire del sòl. Com a conseqüència, les temperatures són més altes i la humitat del sòl és més baixa.

D'aquesta manera, la humitat relativa es relaciona amb la probabilitat d'ignició del combustible, en especial, d'aquelles plantes mortes o seques. Per aquest motiu, a major temperatura o menor quantitat de vapor a l'aire, menor humitat relativa i per tant, major probabilitat d'ignició.

##### **6.2.4.1. L'estrés hídric de les plantes**

Un fet fisiològic molt important dins la problemàtica del foc és l'estrés hídric en la vegetació viva. En situació de sequera no permanent es produeix una baixada del contingut d'aigua ambiental durant un període determinat de temps que provoca una disminució del potencial hídric que sofreixen les plantes. En el clima mediterrani, sovint aquest estrés hídric es produeix a final d'hivern i durant l'estiu. Per aquest motiu, durant un descens de la humitat ambiental i de les plantes, aquestes intenten adaptar-se per perdre el mínim d'aigua durant la transpiració (Carrasco, 2017). Així, al trobar-se les plantes en estrés hídric, es tornen més vulnerables als incendis. Per això, la vegetació climatòfila, vegetació que depèn més de les condicions ambientals, és molt més vulnerable a l'estrés hídric i de pèrdua d'aigua quan una sequedat atmosfèrica és dominant.

De fet, tenint en compte les irregularitats del clima mediterrani en els darrers anys i la sequera a què està sotmesa Mallorca, les plantes es veuen sotmeses a un augment de l'estrés hídric i, com a conseqüència, a un augment considerat del nombre d'incendis (Martínez - Fernández & Ceballos 2003).

##### **6.2.5. El vent**

El vent es pot considerar com el factor meteorològic més important en el comportament d'un incendi. Es tracta d'un factor molt difícil de predir, ja que varia significativament segons l'espai i el temps. De fet, es defineix com el moviment horitzontal de l'aire sobre la superfície terrestre.

Tal moviment, és causat per les diferències de temperatura a petita i gran escala, així com la rotació general de la Terra. En un incendi forestal el vent influeix de moltes maneres (Domínguez Martín, 2008):

- Determina la direcció d'un incendi.
- Pot assecar la humitat del sòl, agreujant la propagació d'un incendi.
- Accelera la dessecació dels combustibles forestals.
- Incrementa l'entrada de oxigen, per tant, alimenta el procés de combustió.
- Desplaça cendra cap a altres indrets accelerant la propagació de l'incendi.
- Inclina les flames cap a distintes direccions incrementant la superfície cremada.

Sovint, a les zones de muntanya marcats per terreny abrupte i amb fort pendent apareix un tipus de vent denominat Föhn. Aquests tipus de vents són producte d'un escalfament de l'aire en el seu descens adiabàtic pel vessant de sotavent. Per tant, són vents càlids i secs, ja que la massa d'aire prèviament haurà precipitat a barlovent (Martínez Ibarra, 2007). D'altra banda, aquests vents tendeixen a ser més forts durant la nit, moment en que es combinen amb els vents descendents de la vall i del vessant local. De fet, aquests tipus de vents poden arribar a velocitats entre 60 i 100 km/h.

Com a conseqüència, tenim un vent més càlid i sec, el qual provoca una gran incidència en els incendis, ja que afavoreix els processos inicials d'ignició i la reactivació de focs latents. (Millán, Estrela &, 1998).

### 6.3. Els incendis a Mallorca

Com s'ha assenyalat, els incendis forestals són una amenaça molt important per a la biodiversitat que es troba a les regions del Mediterrani. En el cas de les Illes Balears durant el 2017, segons dades de IBANAT (Institut Balear de la Natura), hi ha hagut un total de 93 sinistres, amb els quals es va cremar un total de 167.26 ha (Figura 1), entre zones arbrades (48.80 ha) i zones no arbrades (118.46 ha). D'aquests 93, 79 han estat conats i 14 han estat incendis forestals, on es troba el que s'està analitzant (figura 2).

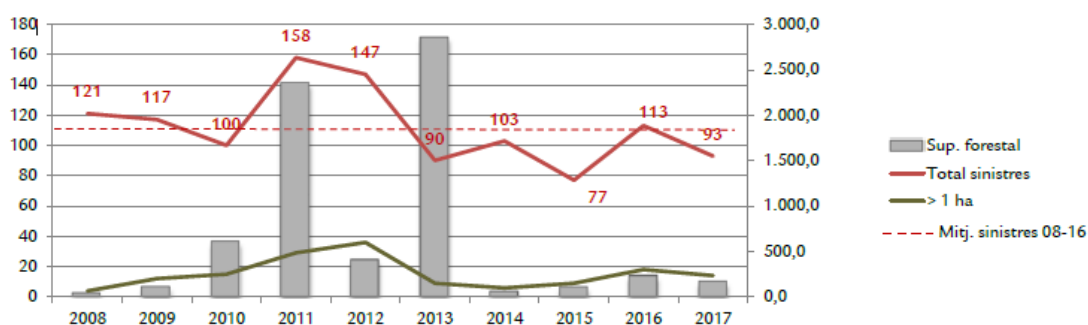


Figura 1. Evolució del nombre de sinistres i de superfície forestal cremada a Mallorca entre el període de 2008 – 2017. Font: IBANAT - resum estadístic incendis forestals 2017, 2018.

D'aquests 93 sinistres que hi ha hagut a les Illes Balears, al voltant de 61 sinistres s'han produït a Mallorca, és a dir, un 66% del total. Per tant, la superfície afectada a Mallorca ha estat al voltant de 119,4 ha. D'altra banda, de tots aquests sinistres, un 58% han estat causats per negligències i causes accidentals, un 25% intencionats i un 9% per causes naturals. En el nostre cas, l'incendi es va catalogar com accidental, a conseqüència de la caiguda d'un transformador i d'uns cables elèctrics.

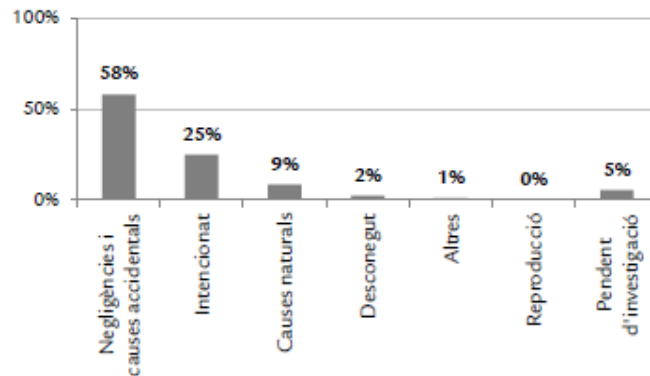


Figura 2. Principals causes dels incendis produïts a Mallorca al 2017. Font: IBANAT - resum estadístic incendis forestals 2017, 2018.

#### 6.4. El clima a Mallorca

El clima de Mallorca, en tractar-se d'un clima mediterrani, presenta unes temperatures temperades amb un règim de precipitacions estacionals, on l'estació seca i càlida es produeix a l'estiu i l'estació plujosa es produeix entre la tardor i l'hivern (Figura 3).

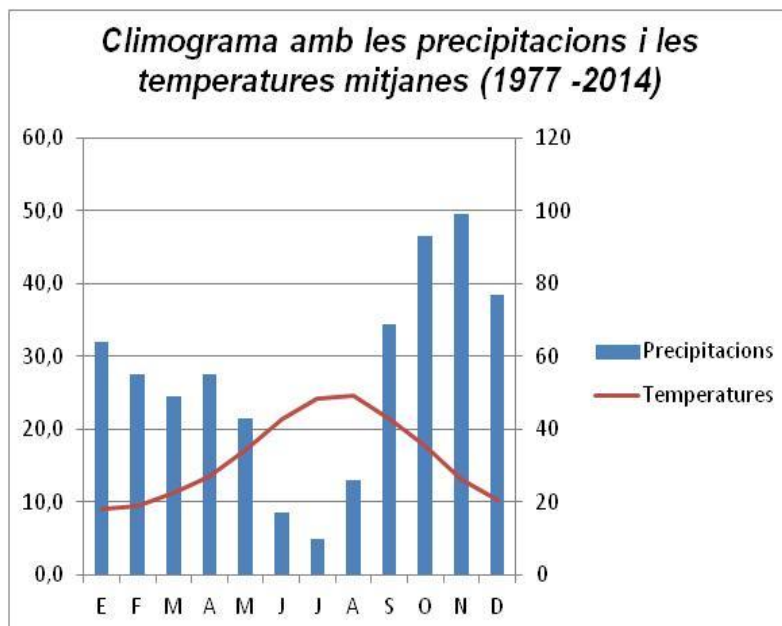


Figura 3. Climograma de Mallorca - temperatures i precipitacions mitjanes (1977 – 2014). Font: AEMET – estadística de les variables meteorològiques.

Analitzant el climograma de la part superior, arran d'aquests 37 anys les precipitacions mínimes es produeixen a l'estiu, juntament amb una pujada de les temperatures (26°C aproximadament) i de la sequera. D'altra banda, les precipitacions màximes, es produeixen durant la tardor i l'hivern arribant a unes màximes de quasi 100 mm. A més, entre aquests mesos es produeixen les temperatures mínimes arribant fins a 10°C aproximadament. No obstant, alguns anys aquestes temperatures i precipitacions han anat variant a causa de la irregularitat del clima mediterrani. De fet, al 2017, segons xifres de l'AEMET, a l'hivern es va produir una davallada de les precipitacions, juntament amb un augment de les temperatures a l'estiu.

## **7. HIPÒTESIS I OBJECTIUS**

Donada la importància que tenen els incendis forestals dins ambients mediterranis on més del 95% són causats per l'home, s'ha considerat oportú realitzar aquest estudi per comprovar com, a part d'haver estat accidental (problema amb un transformador i caiguda de cables elèctrics), al darrere apareixen certs factors detonants d'aquest fenomen. És a dir, a causa de certes condicions climàtiques i meteorològiques es va produir la propagació d'aquest incendi, ja que si no s'haguessin donat aquestes condicions, molt probablement aquest incendi no s'hauria estès de la forma que es va estendre i hagués quedat en un conat, és a dir, insignificant.

D'aquesta forma, l'objectiu d'aquest treball d'investigació és analitzar les condicions climàtiques (condicions de sequera prolongada, humitat del sòl i l'estat de la vegetació) i meteorològiques (pressió atmosfèrica, inestabilitat, velocitat i direcció del vent, humitat relativa) per poder demostrar com aquests factors van ajudar en la propagació d'aquest incendi. A més d'aquest objectiu principal, es deriven els següents objectius secundaris:

- Analitzar mitjançant un índex de sequera les condicions de sequera climàtica durant els darrers anys, i en especial, mesos previs al incendi.
- Analitzar a través de la teledetecció l'estat de la humitat de les plantes i del sòl i l'activitat vegetal durant tres escales temporals (quan no hi havia sequera, moment previs a l'incendi i després de l'incendi).
- Analitzar les condicions meteorològiques durant el mes de desembre i les hores prèvies a l'incendi a partir de dades de Reanalysis i d'una estació meteorològica situada a les proximitats de la zona d'estudi.

## **8. METODOLOGIA**

### **8.1. Obtenció de les dades**

Les imatges satèl·lit que s'han emprat per a la realització d'aquesta anàlisi s'han obtingut a través del portal web United States Geological Survey (USGS) - <https://earthexplorer.usgs.gov/> consultat el 27/02/2018. Per una banda s'han agafat imatges satèl·lit de Landsat 8 pels anys 2017 i 2018. Per altra banda, s'han agafat imatges del 2009 de Landsat 5, perquè Landsat 8 va ser llançat al 2013. La columna i la fila de cada passada dels satèl·lits ha estat Path (columna): 196 i Row (fila): 032. Pel que fan les dates de cada imatge satèl·lit són:

- *Landsat 8*
  - 21 de novembre de 2017
  - 17 de gener de 2018
  
- *Landsat 5*
  - 10 de desembre de 2009

Respecte als valors del SPEI (índex normalitzat de precipitació – evapotranspiració) aquests s'han obtingut del portal web SPEI Global Drought Monitor (<http://spei.csic.es/index.html>) consultat el (4/03/18) pels píxels que ocupen l'illa de Mallorca.

En quant als valors per la pressió atmosfèrica i pel Vertical Total Index s'han usat dades procedents del National Center for Environmental Prediction i National Center for Atmospheric Research, consultat el 04/03/2018, a través del portal web: <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/reanalysis/reanalysis.shtml>

Finalment, les dades meteorològiques del mes de desembre (humitat relativa, mitjana i velocitat màxima del vent i pressió atmosfèrica), aquestes s'han agafat d'una estació meteorològica situada al nucli de Pollença proporcionades per Biel Perelló. El portal web és Meteoclimatic (<http://www.webverd.com/meteo/creus26.htm> consultat el 02/03/2018).

### **8.2. Tractament previ de les imatges satèl·lit**

Un cop obtingut les imatges satèl·lit s'ha passat a realitzar la correcció de la reflectància i de la radiància.

Per realitzar la correcció radiomètrica de les imatges Landsat 8 s'ha emprat l'eina GEOBIA. Es tracta d'una caixa d'eina d'ArcGis, la qual converteix automàticament els Nivells Digitals (ND) de les imatges a valors de radiància i de reflectància. Aquesta caixa d'eines únicament serveix per a imatges Landsat 8. A més, s'ha de dir que la correcció radiomètrica s'ha fet amb una resolució de 15 x 15 metres. D'altra banda, al tractar – se del producte Level 1, les imatges ja estan georeferencides.

Durant el pre – processament de dades comença creant un àrea d'interès en format vectorial, la qual té la mateixa georeferència que les imatges satèl·lit.

Llavors, la primera eina que s'empra és Pan – sharpened composit emprant el fitxer de meta dades, el qual conté factors de reescalfament multiplicador específic de cada banda per la radiància, la reflectància, el temps, l'elevació del Sol, la distància al Sol i la mínima radiació de TOA a tots els canals (Urbanski, 2014).

Un cop tenim això, el següent pas és convertir els valors DN amb radiació mitjançant el coeficient de ressorts radiomètrics a través de l'arxiu de meta dates Landsat 8 MTL. Aquesta radiació espectral de TOA es calcula emprant factors de reactivació i additius específics de banda, descrits com un coeficient M i A. La fórmula per la radiància és:

$$L\lambda = ML Qcal + AL$$

On:

- $L\lambda$  = Radiància espectral en el sostre de l'atmosfera.
- $ML$  = Factor multiplicador de canvi d'escala de banda específic de les metadades.
- $AL$  = Factor additiu de canvi d'escala de banda específica de les metadades.
- $Qcal$  = Valors dels píxels de productes estàndard qualificats i quantificats (ND)

Respecte al càlcul de la reflectància de l'espectre s'inicia amb la conversió de la reflectància DN a TOA. A continuació, es calcula la reflectància mínima d'un per cent i es calcula la reflectància en la superfície de la terra. La seva respectiva fórmula és:

$$\rho\lambda' = M\rho Qcal + A\rho$$

On:

- $\rho\lambda'$  = Reflectància planetària al sostre de l'atmosfera, sense correcció per al angle solar
- $M\rho$  = Factor multiplicador de canvi d'escala de banda específic dels metadades
- $A\rho$  = Factor additiu de canvi d'escala de banda específic de les metadades.
- $Qcal$  = Valors dels píxels de productes estàndard qualificats i quantificats (ND).

Finalment per poder obtenir la reflectància amb la correcció per l'angle solar, s'aplica la fórmula:

$$\rho\lambda = \frac{\rho\lambda'}{\cos(\theta SZ)} = \frac{\rho\lambda'}{\sin(\theta SE)}$$

On:

- $\rho\lambda$  = Reflectància planetària al sostre de l'atmosfera.
- $\theta SE$  = Elevació local de l'angle solar, proporcionat a les metadades.
- $\theta SZ$  = Angle zenital solar local;  $\theta SZ = 90^\circ - \theta SE$

Pel que fa les imatges Landsat 5, s'han corregit manualment mitjançant dues equacions. Per la conversió dels nivells digitals de la imatge a radiància s'ha realitzat a partir de la formula:

$$L\lambda = \frac{(LMAX\lambda - LMIN\lambda)}{(Qcalmax - Qcalmin)} * (Qcal - Qcalmin) + LMIN\lambda$$

On:

- $L\lambda$  = radiància espectral a l'obertura del sensor ( $W/m^2$  sr  $\mu m$ ).
- $Qcal$  = Valor de píxel calibrat i quantificat.
- $Qcalmin$  = Valor mínim de píxel calibrat i quantificat corresponent al LMIN (DN).
- $Qcalmax$  = Valor màxim calibrat i quantificat corresponent al LMAX (DN).
- $LMIN\lambda$  = Radiància del sensor espectral escalat a  $Qcalmin$  ( $W/m^2$  sr  $\mu m$ ).
- $LMAX\lambda$  = Radiància del sensor espectral escalat a  $Qcalmax$  ( $W/m^2$  sr  $\mu m$ ).

A continuació per realitzar la conversió de la radiància a reflectivitat (TOA) s'ha resolt a partir de la següent formula:

$$p\lambda = \frac{\pi * L\lambda * d^2}{ESUN\lambda * \cos \theta_s}$$

On:

- $p\lambda$  = Reflectància planetària TOA (sense unitat).
- $\pi$  = Constància matemàtica equivalent a 3,14159 (sense unitat).
- $L\lambda$  = Radiància espectral a les obertures del sensor.
- $d^2$  = Distància Terra – Sol (en unitats astronòmiques).
- $ESUN\lambda$  = Mitjana de irradiància solar atmosfèrica.
- $\theta_s$  = Angle del Zenit Solar.

### **8.3. Delimitació de l'àrea cremada (NBR)**

Per a la realització de la delimitació de l'àrea sobre l'incendi de Pollença de desembre de 2017 s'han emprat imatges satèl·lit Landsat 8. En especial, s'han agafat imatges que no presentin núvols per als posteriors càlculs i per la visibilitat a la zona d'estudi. Concretament s'han agafat imatges del 21 de novembre de 2017 (pre – incendi) i el 17 de gener de 2018 (post – incendi).

Per poder diferenciar l'àrea cremada s'ha emprat l'índex NBR (*Neutralized Burn Ratio* en anglès) definit pels autors Berson & Key (1999).



Aquest índex combina les dues bandes espectrals que responen al foc de manera més acusada i contrastada: l'infraroig pròxim (NIR), on la reflectivitat baixa degut a la desaparició de la vegetació activa i l'infraroig mitjà d'ona curta (SWIR), on la reflectivitat s'incrementa per la pèrdua d'humitat, la major exposició de sòl i per les menors ombres projectades per la vegetació (Montorio, et al. 2014). La seva formula és:

$$NBR = \frac{IC - IL}{IC + IL}$$

On:

- IC = Infraroig proper.
- IL = Infraroig llunyà.

Llavors, una vegada obtingut el NBR de cada any, es calcula la diferència d'ambdós dies:

$$NBRd = NBR_{pre} - NBR_{post}$$

On:

- NBRd = diferència entre NBR pre-incendi i NBR post-incendi.
- NBRpre = NBR de la imatge pre-incendi.
- NBRpost = NBR de la imatge post-incendi

El resultat és una imatge on es pot distingir clarament l'àrea cremada.

#### **8.4. Càlcul del NDVI**

L'índex de diferència de vegetació normalitzat (*Normalized Difference Vegetation Index* en anglès) és una mesura amb la qual es pot estimar la quantitat, qualitat i desenvolupament de l'estat de la vegetació. Es basa en la intensitat de la radiació de certes bandes de l'espectre electromagnètic que la vegetació reflecteix fins a un sensor remot. En aquest cas s'ha emprat Landsat 8 i Landsat 5. Per tant, com més activitat fotosintètica presenti la cobertura vegetal, més reflectivitat té la banda de l'infraroig proper. D'altra banda, com més comenci a envellir la cobertura vegetal, més reflectivitat es veurà a la banda del roig (Goward et al 1991). Així doncs, la formula es basa en:

$$NDVI = \frac{(NIR - Red)}{(NIR + Red)}_1$$

- NIR = Infraroig pròxim (Banda 5).
- Red = Vermell (Banda 4).

El resultat que s'obté són valors del NDVI de tres imatges satèl·lit. Una, anys anteriors marcat per un període d'humitat, 10 de desembre de 2009. L'altre abans de l'incendi, és a dir, el 21 de novembre de 2017 i finalment el 17 de gener de 2018, després de l'incendi. Així es pot comparar quin és l'estat de la vegetació un cop s'ha produït. Els seus valors es comprenen entre 1 i -1.

---

<sup>1</sup> Respecte a les imatges Landsat 5 s'ha obtingut a partir de la Banda 4 i Banda 3.

Respecte a -1, aquest valor correspon a la vegetació menys sana. Per això es reflecteix major dins l'aspecte visible i menys dins l'infraroig. En canvi el valor de 1 correspon a la vegetació més sana. Per tant, es reflecteix més dins l'infraroig (Martínez-Murillo et al 2016 ). Així, amb la realització d'aquest índex es podrà detectar el canvi espai – temporal de l'estat de la vegetació i avaluar el comportament del foc.

### **8.5. Càlcul del MSI**

L'índex d'estrés d'humitat (en anglès *Moisture Stress Index*) s'empra per dur a terme l'anàlisi de la humitat de la vegetació i del sòl, així com la predicció de productivitat i la modelització física. Inicialment va ser proposat per Hunt & Rock (1989) per detectar canvis en el contingut d'aigua de les fulles emprant la relació de reflexió infraroja pròxima i mitjana. Així doncs, aquest índex combina les reflectivitats captades a l'infraroig pròxim (NIR) i l'infraroig mitjà (SWIR). D'aquesta forma, es calcula mitjançant la següent fórmula:

$$MSI = \frac{(SWIR)}{(NIR)}^2$$

On:

- NIR = Infraroig pròxim (Banda 5).
- SWIR = Infraroig mitjà (Banda 6).

En aquest cas, també s'han agafat els mateixos períodes temporals. En definitiva, aquest índex és una gran alternativa per poder conèixer l'estat d'estrés hídric d'una cobertura vegetal. A més, està relacionat amb la temperatura de la planta i la humitat aprofitable del sòl.

### **8.6. Índex normalitzat de precipitació – evapotranspiració (SPEI)**

Segons l'OMM, 2016 (Organització Meteorològica Mundial) defineix la sequera com un perill natural insidiós resultat d'uns nivells de precipitacions que estan per davall del que es considera normal. Quan aquest fenomen s'allarga durant una estació o durant un període de temps més gran, la precipitació tendeix a davallar encara més, per tant, es considera insuficient per respondre a les demandes de la societat i del medi ambient. Així doncs, la sequera s'ha de considerar com un estat relatiu i no absolut. Altres factors que incideixen en la sequera són les temperatures, el vent i la humitat relativa.

Per caracteritzar la duració i la magnitud de la sequera que viu Mallorca durant els últims anys s'ha emprat el SPEI (*Standardised Precipitation – Evapotranspiration Index* en anglès). Es tracta d'un índex proposat al 2010 per l'Institut Pirinenc d'Ecologia de Saragossa. És un índex estandarditzat (mitjana = 0) de precipitació i evapotranspiració que computa el balanç hídric per a qualsevol escala temporal (nombre de mesos acumulats) (Bequeria et al. 2014). Per tant, ens permet estimar l'impacte de la sequera en la disponibilitat de diferents recursos hídrics.

---

<sup>2</sup> Respecte a les imatges Landsat 5 s'ha obtingut a partir de la Banda 5 i Banda 4.

En aquest índex, els valors positius (major que 0), signifiquen que el balanç hídric és positiu. Per tant, la precipitació és major que l'evapotranspiració. D'altra banda, si els valors són negatius (per davall de 0), significa que el balanç hídric és negatiu. O sigui, la precipitació és menor que l'evapotranspiració. D'aquesta manera, els valors de l'índex segons (Vicente-Serrano et al. 2010) signifiquen:

- 2 o més: extremadament humit.
- 1.5 a 1.99: Molt humit.
- 1.0 a 1.49: moderadament humit.
- -0.99 a 0.99: normal o aproximadament normal.
- -1.0 a -1.49: moderadament sec.
- -1.5 a -1.99: severament sec.
- -2 o menys: extremadament sec.

En el nostre cas, s'ha calculat el SPEI per a una escala temporal de 12 mesos. Això significa que cada valor mensual del SPEI representa el dèficit o superàvit hídric acumulat dels 12 mesos anteriors.

### **8.7. Pressió atmosfèrica i Vertical Total Index**

Per definir les condicions mitjanes d'estabilitat i de pressió atmosfèrica durant el moment de l'incendi, s'han emprat valors procedents del Reanalysis de NCEP - NCAP. Es tracta d'una base de dades climàtiques globals, en format GRID amb dades diàries des del 1948 fins a l'actualitat. És el resultat d'un procés d'assimilació en simulacions realitzades a través de models climàtics globals. A més, corregeix la simulació meteorològica mitjançant el mesurament a temps real de dades en superfície, en el mar, amb radiosondatges, satèl·lits, etc.

Respecte al Vertical total índex, aquest es tracta d'un subíndex del Total Total Index que calcula la diferència de temperatura entre els 850 hPa i 500. Per tant, a major temperatura a nivells baixos i menor en altura, major serà el valor del índex i major serà la inestabilitat atmosfèrica (Miller, 1967). Així doncs, el Vertical Total és una mesura de com flota la bombolla d'aire a causa de l'escalfament de l'aire als nivells baixos.

Quan el Vertical Total dona 40°C, significa que el gradient ambiental de temperatura està a prop del gradient adiabàtic sec per la capa de 850 – 500 hPa i per tant hi ha inestabilitat atmosfèrica absoluta. No obstant això, els seus valors solen ser més baixos i es considera que els valors propers a 26 °C, ja apareix una inestabilitat atmosfèrica i, com a conseqüència, es formen tempestes per convecció (sense tenir en compte la humitat). ([http://weather.uky.edu/about\\_totl.htm](http://weather.uky.edu/about_totl.htm), 18-04-2018).

$$VT = T(850 \text{ hPa}) - T(500 \text{ hPa})$$

On:

- VT = Vertical Total Index
- T = Temperatura del nivell geopotencial.

## 9. ÀREA D'ESTUDI

La zona d'estudi del present treball és el coll de Siller. Es tracta de la zona que es va veure afectada per l'incendi forestal al Port Pollença el passat 27 de desembre de 2017 (Figura 4).

Aquesta zona es localitza a la part nord de l'illa de Mallorca (Illes Balears) i pertany al municipi de Pollença. De fet, es localitza a la part més septentrional de la Serra de Tramuntana, considerada com a Patrimoni Mundial per la UNESCO dins la categoria de Paisatge Cultural. La superfície cremada ocupa unes 80 hectàrees aproximadament, el 20% de les quals pertany a pasturatge natural i el 80% a vegetació esclerofil·la. És a dir, està ocupat per arbusts arbrats, per exemple pins i càrritx. A més, la localització d'aquest incendi presenta un gran valor ecològic, per això, es considera un espai natural protegit. Mostra d'això, presenta diverses figures de protecció com per exemple LIC (Llocs d'Importància Comunitària) i ZEPA (Zones d'Especial Protecció per les Aus). Cal esmentar que en els darrers 23 anys ha hagut 4 incendis en aquesta zona, sent aquest darrer el que major superfície ha cremat. Així doncs, segons el IV Pla General de defensa contra incendis forestals de les Illes Balears (Decret 22/2015, BOIB núm. 056, del 2015) té catalogat aquest lloc com una zona de risc molt alt.

D'altra banda, com ja s'ha esmentat a l'apartat de Clima a Mallorca, la zona d'estudi correspon al clima mediterrani. Així, la mitjana de les seves temperatures anuals es troba entorn al 15 -16 °C i la precipitació mitjana anual s'equival a uns 500 – 600 mm. No obstant, al situar-se en la zona nord de l'illa, les precipitacions registren un augment, malgrat que en el 2017 hagi hagut una disminució a causa d'un període extrem de sequera que es viu a Mallorca, el qual s'exposa a continuació.

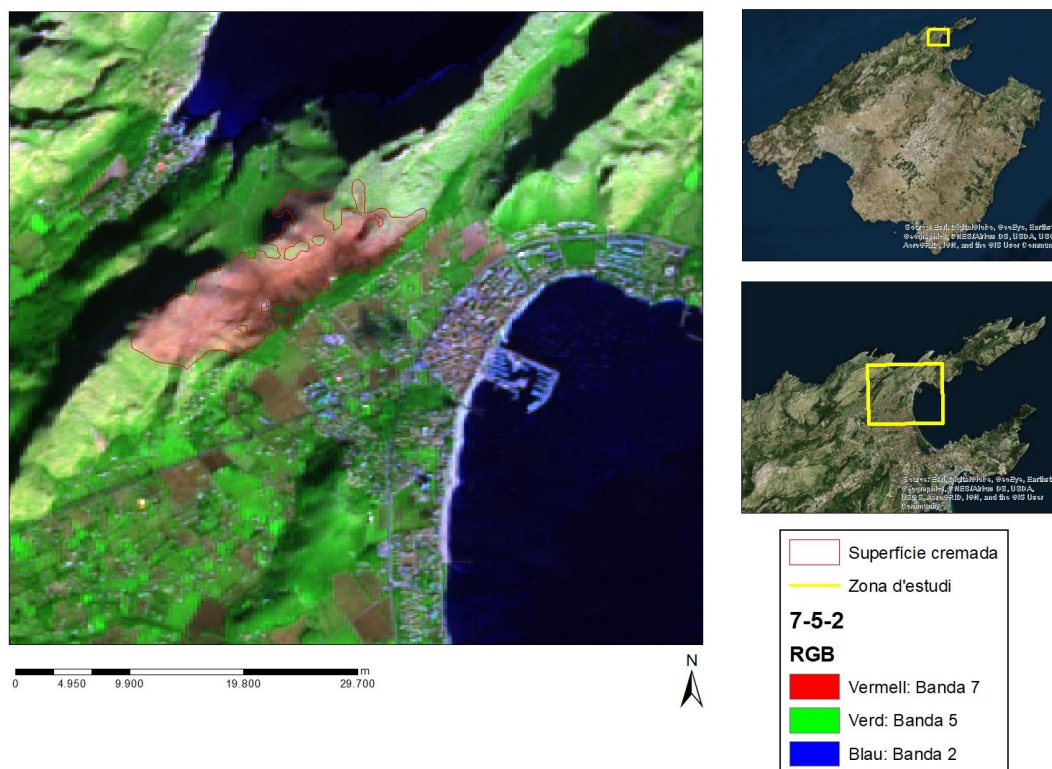


Figura 4. Zona d'estudi mitjançant l'eina NBR.

## 10. RESULTATS I DISCUSSIÓ

### 10.1. Anàlisi de l'índex normalitzat de precipitació - evapotranspiració (SPEI)

Com ja s'ha fet referència, el SPEI es va concebre per poder quantificar el dèficit o superàvit de precipitació per diverses escales temporals. Els episodis de sequera tenen lloc al moment en el qual els valors del SPEI siguin contínuament negatius i arribin a una intensitat de -1 o inferior. Així doncs, el període finalitza quan els valors del SPEI arribin a ser positius. Segons Vicente-Serrano et al (2010), aquest índex presenta xifres per escales temporals de 2,6,12,24 i 48 mesos. En aquest cas, s'han agafat valors per a una escala temporal de 12 mesos.

El SPEI en aquestes escales temporals reflecteixen patrons de precipitació a llarg termini. Un SPEI de 12 mesos és una comparació de la precipitació de 12 mesos consecutius registrats en tots els anys que s'ha agafat l'estudi, en aquest cas del 1950 al 2017 (Figura 5).



Figura 5. SPEI de Mallorca a una escala temporal acumulada de 12 mesos.

Com s'observa a la figura 5, Mallorca al llarg del temps ha estat sotmesa a distints períodes de sequera i humitat, sent els darrers anys els que presenten valors més allunyats de la mitjana, és a dir, de 0. Tenint en compte la classificació obtinguda per Vicente Serrano et al (2010) esmentada a l'apartat 8.6., Mallorca del 2007 al 2009 estava en un període entre moderadament i molt humit. No va ser fins al 2010, quan va estar sotmesa a un període d'extrema sequera, ja que molts dels valors compresos entre aquests 7 anys estan entre el -1 i el -2.

De fet, al 2016 es varen arribar fins al -4. Malgrat que al 2017 hagi disminuït, es pot veure que continuem estant amb un dèficit de precipitacions. Per tant, es pot afirmar que durant els últims 6 anys s'ha viscut un període continuat de dèficit hídric, essent més acusat durant el 2016 i el 2017. Per aquest motiu, aquestes condicions de sequera poden haver afavorit en gran mesura la concurrència d'aquest incendi i la majoria de incendis forestals que s'han produït en els darrers anys a Mallorca, ja que la sequera és una de les principals causes per les quals la vegetació es torna més combustible, encara que algunes plantes siguin esclerofil·les i s'hi adapten.

## 10.2. Anàlisi de l'estat de la vegetació (NDVI)

En produir-se un dèficit de precipitacions a Mallorca, malgrat que les plantes siguin esclerofil·les (adaptades a la sequera), un increment en el període d'extrema sequera dificulta l'aparició de més vegetació viva i propicia l'aparició d'un augment exponencial del nombre de incendis.

De fet, un indicador útil per poder quantificar i analitzar l'estat de la vegetació és l'índex de diferència de vegetació normalitzat (NDVI en anglès). A través d'aquest índex s'estima la qualitat i el desenvolupament de l'estat de la vegetació. Així, en emprar aquest tipus d'índex es pot comprovar com sí disminueix l'activitat vegetativa, el combustible és més susceptible de ser cremat amb molt més facilitat i el risc de foc augmenta.

Llavors, calculant aquest índex abans de produir - se l'incendi i després de produir - se es poden obtenir resultats factibles per poder comparar la quantitat de vegetació que s'ha cremat, la mitjana que presenta cada any i el dany forestal que ha causat aquest fenomen (Figura 6). De la mateixa manera, comparant el NDVI d'anys amb un nivell alt d'humitat (com el 2009) i anys amb extrema sequera (com el 2017), podem observar la resposta de la vegetació a les condicions de sequera i, per tant, estimar la seva vulnerabilitat a la incidència dels incendis.

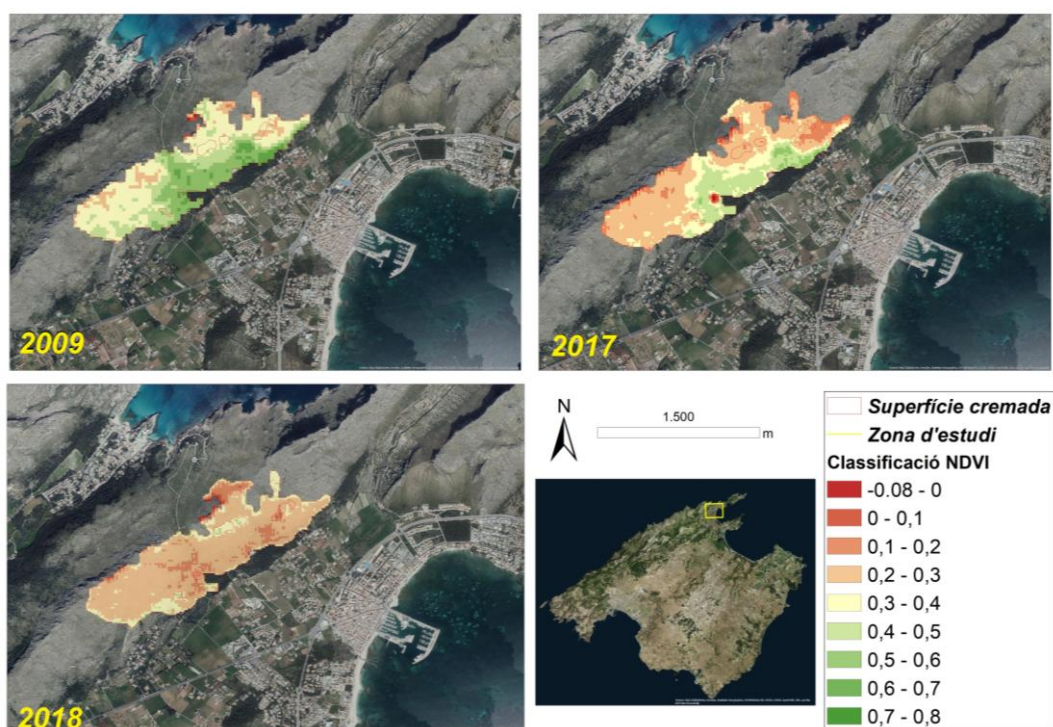


Figura 6. NDVI dels anys 2009, 2017 i 2018<sup>3</sup>.

<sup>3</sup> Malgrat que els valors siguin de 1 fins -1, s'ha volgut unificar les llegendes dels tres mapes en una sola a fi d'observar amb major detall l'evolució espai - temporals de l'estat de la vegetació. Per això, els valors són a partir del valor més alt i del més baix dels tres mapes.

Com es pot observar a la figura 6 i en els histogrames de la figura 7 clarament es veu com l'estat de la vegetació ha canviat de manera abrupta durant les 3 escales temporals. Inicialment, al 2009, moment en el qual Mallorca estava sotmesa a un període d'humitat, es pot veure com presenta valors més propers a 1. La vegetació més viva està entorn als 0.6 i 0.8. De fet, al 2009 el valor més baix, és a dir, vegetació menys sana es troba entorn al 0.1 i 0.3. D'altra banda, al 2017, moment en el qual Mallorca estava sotmès a un període d'extrema sequera, es pot comprovar com l'estat de la vegetació ha canviat. Malgrat que continuï a la part sud de la zona d'estudi vegetació sana, es pot veure com ha minvat el percentatge. Per tant, apareix una predominança de vegetació menys sana. Així doncs, la vegetació més sana està entorn al 0.4 – 0.5 i la vegetació menys sana, entorn a 0.

Finalment, al 2018, moment posterior al incendi, es pot veure com l'estat de la vegetació ha baixat de manera significativa. De fet, en considerar els valors de tota la zona d'estudi entorn al -0.08 i 0.2 es pot considerar com a vegetació nua o cremada. Per aquest motiu, segons (Chuvieco, 2008) els valors propers a 1 presenten una vegetació més viva; en aquest cas corresponen a pinars i arbusts. En canvi, els valors més propers a 0 i per davall corresponen a vegetació menys sana i roca nua; en el cas de l'incendi, a vegetació cremada.

Així doncs, davant les condicions de forta sequera, la vegetació es torna menys sana. Com a conseqüència, es torna més vulnerable i provoca que, en cas d'incendi, es faciliti la ignició del combustible de la vegetació morta o en mal estat.

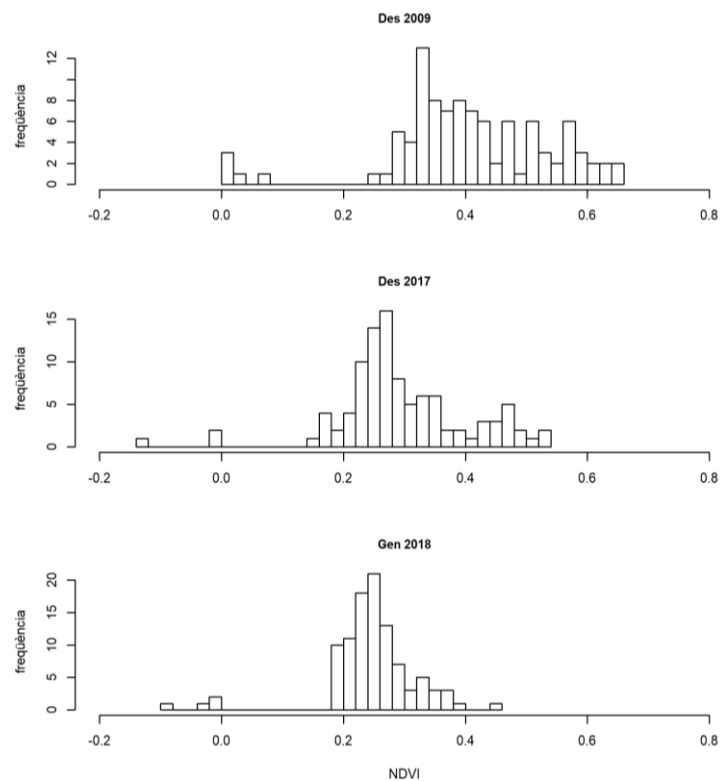


Figura 7. Histogrames sobre l'estat de la vegetació dels distints períodes segons el NDVI.

### 10.3. Anàlisi de l'estrés hídric de la vegetació (MSI)

Quan domina una sequedat atmosfèrica es produeix un estrés hídric i una pèrdua d'aigua. Per això disminueix la quantitat de la vegetació, encara que les plantes dins el clima mediterrani s'adaptin a la sequera. Així doncs, un índex que també es correlaciona amb l'estat de la vegetació és l'estrés hídric de la humitat del sòl (MSI en anglès). Com més negatius siguin els seus valors, més humitat presenten. En canvi, com més elevats siguin, a més estrés hídric està sotmès (Hunt & Rock, 1989).

Els períodes que s'ha agafat han estat el 2009, el 2017 i 2018. És a dir, al 2009, com s'ha dit anteriorment, Mallorca estava sota un període de relativa humitat. En canvi, dins el 2017 ens trobem davant un dèficit de precipitacions. Finalment destaca el 2018, per veure la diferència que hi ha d'estrés hídric moment posterior a l'incendi (Figura 8). Per aquest motiu, la humitat de la vegetació ha davallat respecte als 3 anys i s'està produint un estrés hídric significatiu, el qual està sent un factor clau amb la intensificació del nombre d'incendis a les Illes Balears.

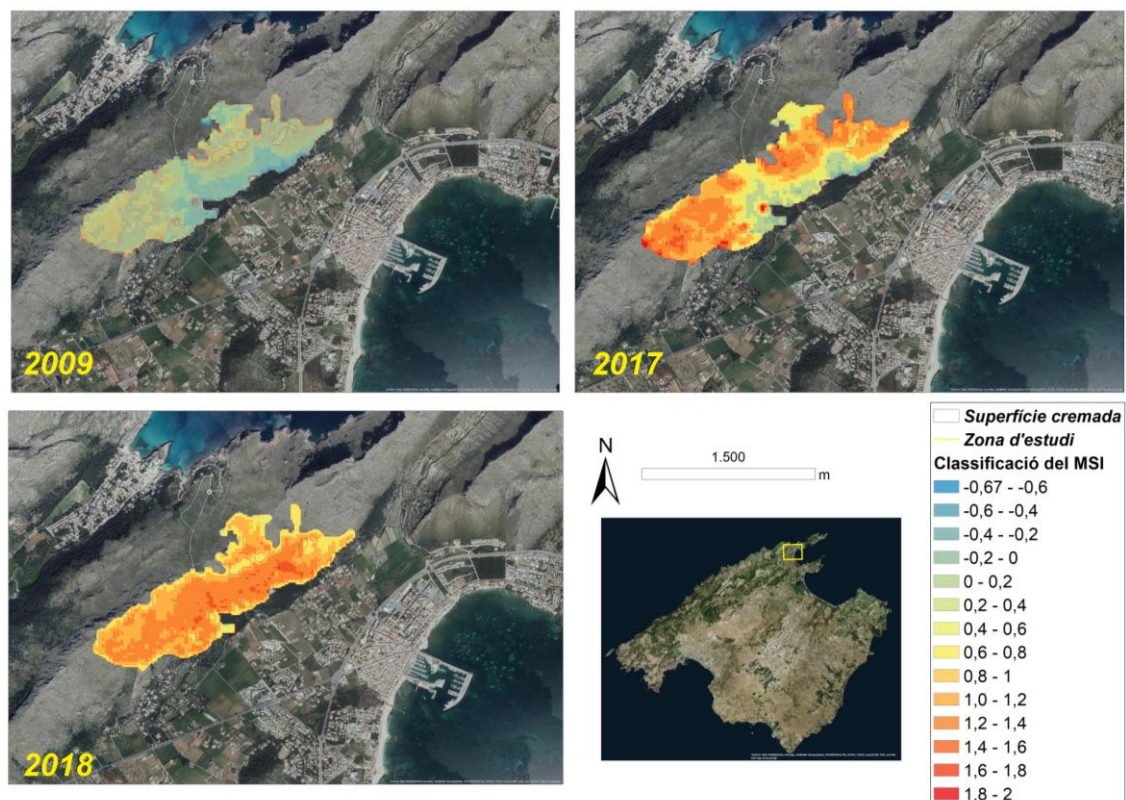


Figura 8. Estrés hídric (MSI) de l'any 2009, 2017 i 2018.<sup>4</sup>

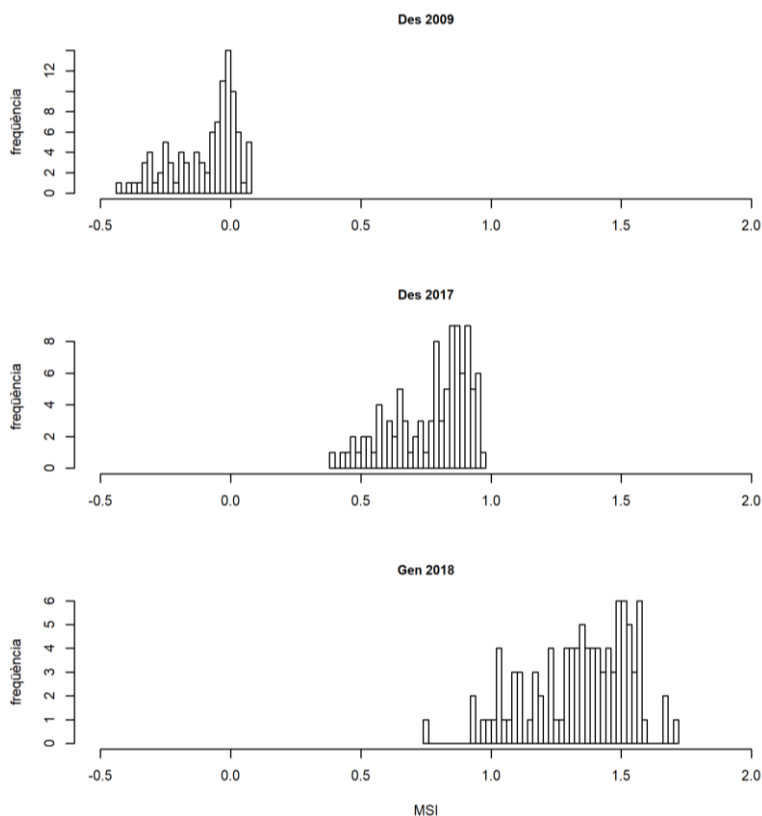
Observant la figura 8, al 2009, moment en què Mallorca estava marcat per un període d'humitat, presenta els valors més negatius. Per tant, la probabilitat que es produís un incendi era mínima ja que al presentar una vegetació amb humitat la propagació d'un incendi és relativament baixa. D'altra banda, al 2017 (any que s'ha produït l'incendi), Mallorca ja estava sotmès a un període d'extrema sequera.

<sup>4</sup> Els valors del MSI també són de 1 fins -1. No obstant, s'ha unificat la llegenda i s'ha elaborat a partir dels valors més alts i més baixos dels tres mapes per observar amb més detalls els canvis espais – temporals que sofreix l'estrés hídric de les plantes i el sòl dins la zona d'estudi. Per aquest motiu el valor més elevat és 2.



Per això, es pot observar com tan sols un petit percentatge a la part sud de la zona d'estudi conté valors negatius, és a dir, una quantitat baixa de vegetació conté humitat. Aquesta zona també es relaciona amb l'estat de la vegetació esmentat anteriorment. En canvi, la major part de la zona presenta valors més alts d'estrés hídric, per tant és més vulnerable als incendis.

Finalment, al 2018, moment posterior a l'incendi, es pot observar com tota la vegetació cremada i el sòl presenta valors elevats en quan estrés hídric. Per tant, fins que no tornin períodes de precipitació, la vegetació i en aquest cas el sòl continuarà en estrés hídric. No obstant, cal dir que durant el període de redacció d'aquest treball, pareix que s'estan recuperant els valors de precipitació. Per aquest motiu, al considerar el clima Mediterrani molt irregular, es produeix una sequera que condiona la humitat de la vegetació ocasionant una pèrdua d'aigua i un estrés hídric a les plantes. Com a conseqüència, les plantes es tornen més vulnerables als incendis perquè la seva combustió és més fàcil de generar – se.



*Figura 9. Histogrames sobre l'estrés hídric dels distints períodes d'estudi.*

De fet, per poder analitzar les xifres d'estrés hídric, com es pot veure a la figura 9, els tres anys presenten valors distints. Al 2009, els valors estan al voltant de -0.5 i 0.1, per tant, presenta valors d'humitat. En canvi, al 2017, moment de sequera, s'observa com els valors estan entorn 0.4 i 1. Per això, s'ha de tenir en compte que la vegetació es torna més vulnerable al foc. Finalment, al 2018, moment posterior a l'incendi, es pot observar com presenta valors significatius prop de 2. Això significa que els moments posteriors a l'esdeveniment el sòl encara presenta més dèficit hídric que abans de produir – se, a causa de l'efecte de dessecació, el qual el produeix la calor que genera el foc.

#### 10.4. Anàlisi meteorològica del mes i del moment que va ocórrer l'incendi

En quant a les dades meteorològiques, s'han analitzat la pressió i la inestabilitat atmosfèrica, la temperatura, la humitat relativa, el vent ( direcció i velocitat mitjana i màxima) i la precipitació. A més, de cada factor s'ha dut a terme la mitjana per poder comparar la diferència entre el mes de desembre i el moment concret en el qual es va produir el incendi.

D'altra banda, les condicions d'estabilitat o inestabilitat venen condicionades pel gradient ambiental de temperatura i la circulació de l'aire a la part inferior i superior de l'atmosfera.

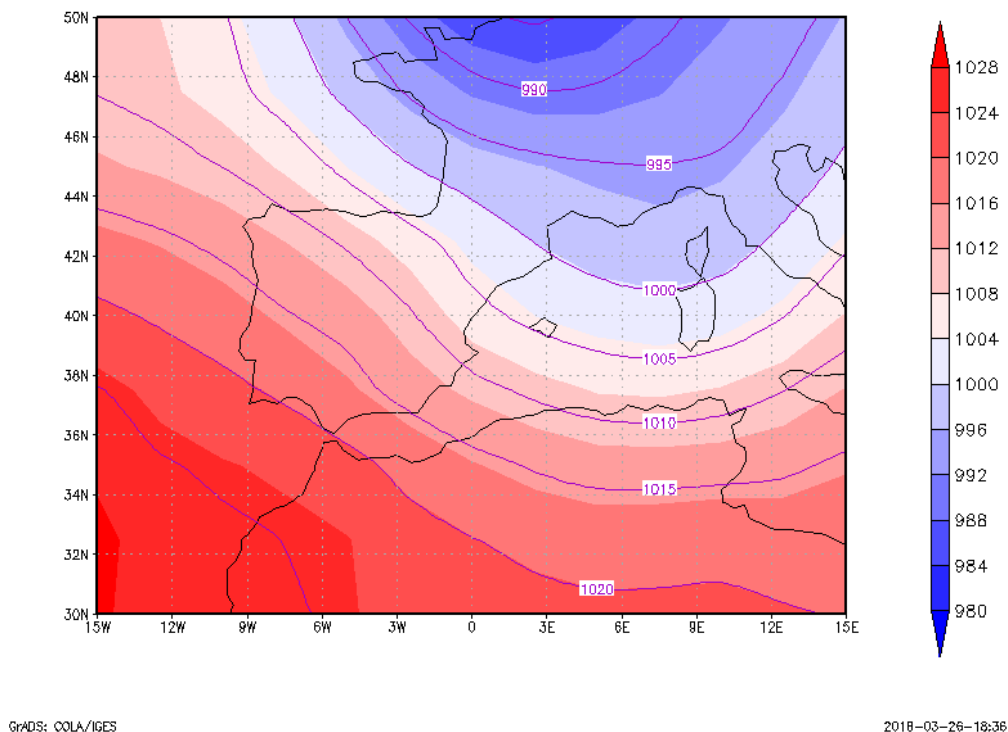


Figura 10. Pressió atmosfèrica (hPa) durant el dia del incendi.

Com es pot observar a la figura 10, moments previs a l'incendi Mallorca i la part nord del Mediterrani es trobava sota el domini de les baixes pressions (isòbara de 1005 hPa), degut a la influència d'un centre d'acció ciclònic situat entre França i les Illes Britàniques (fora dels marges de la figura).

Per poder calcular la inestabilitat atmosfèrica s'ha emprat l'índex Vertical Total. Com es pot veure a la figura 12 de la part inferior, en altura, moments previs a l'esdeveniment, Mallorca presentava condicions de relativa inestabilitat atmosfèrica. Aquesta inestabilitat està associada al centre de baixes pressions citat anteriorment, ja que entre els 850 hPa i els 500 hPa presentava una diferència de  $26^{\circ}$  (figura 11). D'aquesta forma, es va afavorir la re – alimentació i la propagació del foc perquè es va generar convecció en vertical i el buit va ser reemplaçat per oxigen procedent de les zones circumdants.

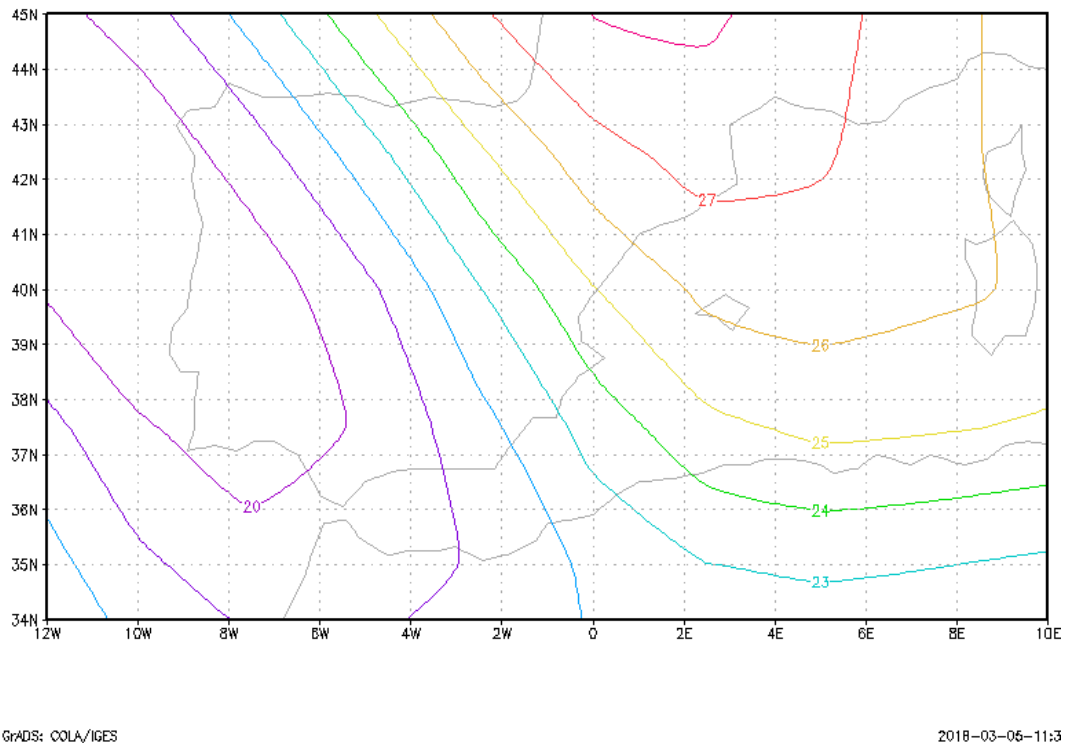


Figura 11. Valors del Vertical Total Index del dia del incendi.

Cal ressaltar que, tant la figura 10 com la figura 11, representen les condicions de pressió i inestabilitat atmosfèrica a una escala regional. Per tant, presenten una baixa resolució espacial derivada de la base de dades del Reanalysis. Així doncs, per poder afinar aquesta anàlisi i així poder justificar la concurrència de l'incendi al Port de Pollença, s'han analitzat una sèrie de paràmetres meteorològics d'una estació situada a les proximitats de la zona d'estudi (figures 12 i 13 i taules 1 i 2).

En primer lloc, la humitat relativa durant el mes de desembre oscil·lava entorn a 30 i 80 % ( figura 12), essent la mitjana entorn al 60% (taula 1). No obstant, durant les hores prèvies a l'incendi, la humitat relativa descendeix a valors de 38% aproximadament (taula 2). Per tant, en presentar xifres molt per davall de la mitjana, aquesta condició és molt favorable en la propagació de l'incendi, ja que les plantes es tornen més vulnerables a la ignició del combustible.

En segon lloc, durant el mes de desembre, es varen produir una sèrie de ràfegues de vent prou significatives (figura 12). Així tot, la mitjana del mes de desembre era de 6 km/h. En canvi, el moment en que es va propagar el foc, la mitjana del vent va ascendir fins al 20 km/h. D'altra banda, observant les màximes es pot observar com a inicis de mes es va produir una ràfega de vent prou apreciable. No obstant, la humitat relativa era alta. Per aquest motiu, si s'hagués produït l'incendi, possiblement no s'hagués propagat. Ara bé, observant el dia que es va produir, es pot veure com presentava unes ràfegues màximes de vent de 80 km/h. Si tot això se li suma la zona on es va propagar i el moment en que es va produir (entre les 19 i 21 h), entra en joc el vent Föhn perquè durant la nit es torna més fort i es combina amb els vents descendent de la vall. En especial, les dues hores que es va propagar hi havia una mitjana de velocitat màxima de 72 km/h (taula 2).

A més a més, la direcció predominant, la qual va ajudar en la propagació de l'incendi, era de NNE, N i W, WSW (figura 13). Pel que fa la pressió atmosfèrica, com bé s'ha parlat a la figura 10 se situava entorn als 1005 hPa. Com es pot veure a la figura 12, els quatre moments en que davalla la pressió es correlacionen amb l'augment de la velocitat del vent. De fet, la mitjana durant el mes de desembre és de 1018 hPa (taula 1). Ara bé, durant les hores que es va produir l'incendi, es pot veure com presenta una mitjana de 1002 hPa (taula 2). Per tant, es corrobora amb la figura anteriorment analitzada. És a dir, durant les hores que es va produir la propagació del foc, la pressió atmosfèrica va davallar abruptament.

Un paràmetre que també s'hauria de tenir en compte és la precipitació. Aquest paràmetre hagués estat clau, perquè sí hagués plogut possiblement no s'hauria propagat el foc o la superfície afectada hauria estat menor. Malauradament, durant el mes de desembre la mitjana de precipitació va ser quasi nul·la (mitjana de 0.08 mm) i el moment de l'incendi no va precipitar (taules 1 i 2).

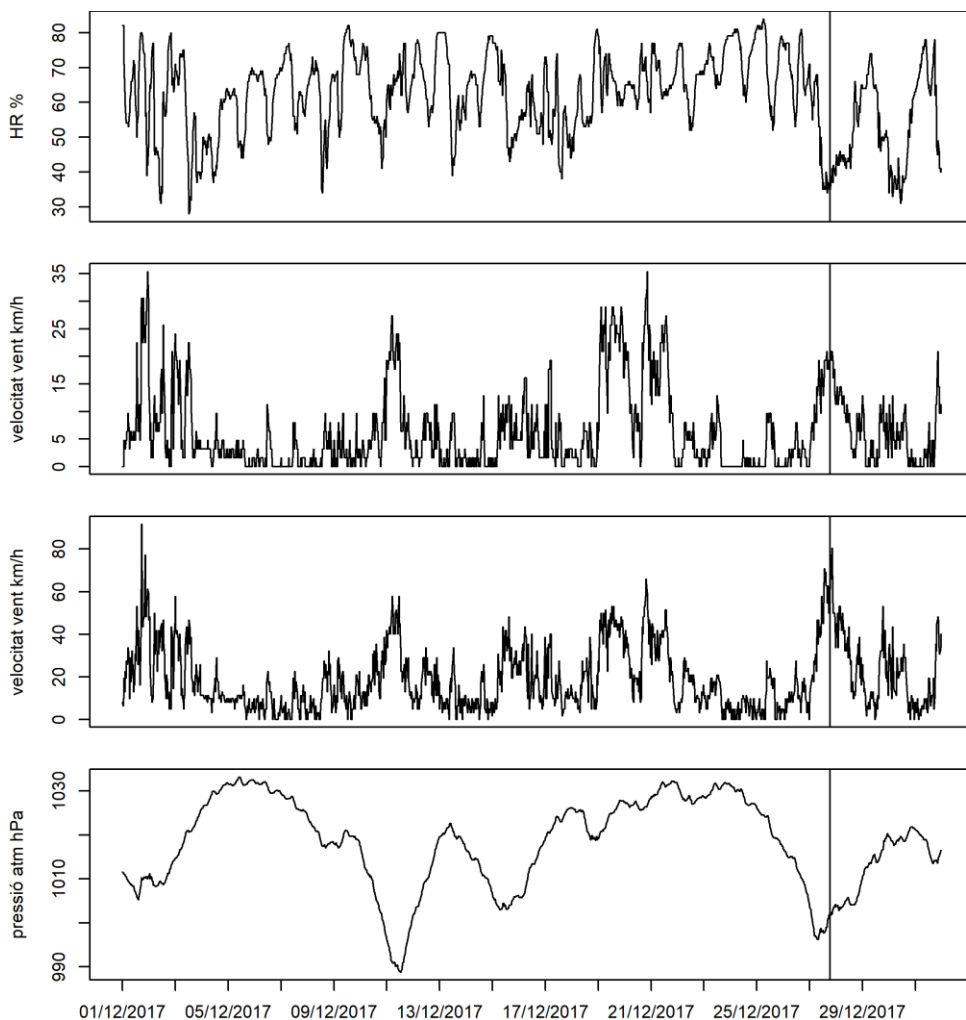


Figura 12. Dades meteorològiques (Humitat relativa, mitjana de velocitat del vent, velocitat màxima del vent i pressió atmosfèrica) del desembre de 2017. La línia vertical indica el moment en que es va produir el incendi.

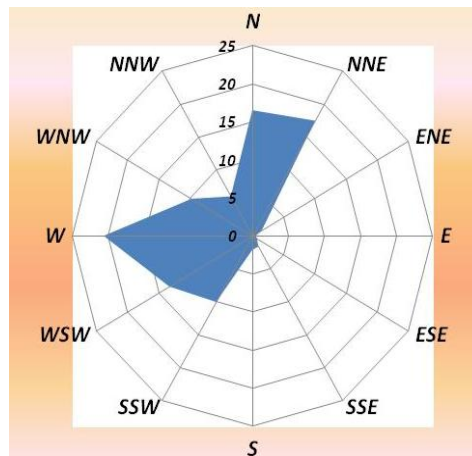


Figura 13. Rosa dels vents del mes de desembre de 2017.

MES DE DESEMBRE	T mitjana	T màx.	T mín	Humitat relativa	Vent Km/h	Velocitat màx.	Pressió atmosfèrica	Precp.
Mitjana	10,82	11,05	10,59	61,89	6,23	18,98	1018,21	0,08

Taula 1. Mitjana sobre les dades meteorològiques del mes de Desembre de 2017.

MOMENT DEL INCENDI	T mitjana	T màx.	T mín	Humitat relativa	Vent Km/h	Velocitat màx.	Pressió atmosfèrica	Precp.
Mitjana	11,84	11,96	11,82	37,80	20,58	71,78	1002,16	0,00

Taula 2. Mitjana sobre les dades meteorològiques el moment del incendi (19 – 21 h).

Ara bé, analitzant altres investigacions sobre la propagacions d'incendis, molts d'estudis presenten causalitats semblants a aquest. No obstant, cal dir que els citats són en període estival. En primer lloc, (Arnol, 2005) va analitzar la inestabilitat atmosfèrica mitjançant l'índex Total Total (aquest índex a més de la diferència de temperatura, també té en compte la humitat atmosfèrica). En el seu estudi va observar com al voltant de 2 incendis ( Càceres- agost de 2003 i Osca – juliol de 2004) presentaven valors amb intervals de 40 – 50, per tant, inestabilitat atmosfèrica. Un altre exemple el trobem en (Cacho et al 2009) el qual va realitzar un anàlisi meteorològic de l'incendi que va ocórrer a Zuera (Saragossa) el passat 5 d'agost de 2008. Dins el seu estudi ressalta la inestabilitat atmosfèrica, la davallada de la humitat relativa, la velocitat i direcció del vent (component W) i destaca els valors de sequera a través del SPI. Aquest índex, malgrat no inclogui la evapotranspiració, presenta uns valors similars a l'índex normalitzat de precipitació – evapotranspiració (SPEI).

Finalment, en el treball de final de grau de (Sánchez, 2017), analitza un incendi que va ocórrer el passat juliol de 2015 a Ordena (Catalunya). Dins aquest estudi a part d'analitzar l'àrea cremada mitjançant el NBR i l'estat de la vegetació a través del NDVI, també analitza les condicions meteorològiques. Les principals causes entre altres, varen ser la davallada de la humitat relativa i les fortes ràfegues de vent.

Així doncs, a través d'aquests exemples que presenten característiques similars, es pot comprovar com els factors meteorològics que varen ocórrer durant el mes de desembre i el dia i moment que es va produir l'incendi, varen ser claus en la seva propagació.

### **10.5. Reptes del futur**

La predicció del risc d'incendis és una eina molt útil per desenvolupar treballs de prevenció, tals com extingir el foc, evitar que es propagui o realitzar estratègies futures per tal de que no es produeixin incendis. Malauradament, els incendis forestals són uns esdeveniments molt difícils de modelitzar. Com bé s'ha analitzat amb anterioritat, apareixen multitud de paràmetres que determinen l'inici i el desenvolupament. Per això, és molt complicat predir on, quan i com es desenvoluparà (San Miguel – Ayanz et al, 2002).

No obstant, en els darrers anys estan augmentant de manera notable les investigacions per realitzar indicadors que prediuen la concurrència dels incendis. Dintre d'aquests indicadors, s'adjunten índexs sobre variables meteorològiques (a temps real i futur), models de disponibilitat de combustible i registres històrics sobre altres incendis dins la mateixa zona. A part d'això, s'integren imatges satèl·lit per poder facilitar les estimacions a temps real. Aquests índexs de perill es classifiquen en curt termini i llarg termini. Els primers, se realitzen estimacions diàries del risc d'incendi per propòsits tàctics i operatius i el segon, s'avaluen els riscos a diverses escales per fins estratègics (Bermúdez, et al 2007).

A través dels índexs de perill a llarg termini, se pot analitzar aquelles àrees que presentin un alt risc d'incendi causat per les condicions que presenti la zona, així com les zones on convindria reforçar la prevenció. D'aquesta manera, a partir de l'anàlisi d'altres incendis històrics i simuladors de comportament del foc com FARSITE<sup>5</sup> o BEHAVE<sup>6</sup> es pot analitzar el patró del comportament de incendis futurs. Així doncs, es pot identificar els punts crítics o sensibles, simulacions d'incendis i d'aquesta forma, validar l'eficiència de infraestructures per prevenir aquests esdeveniments (Rifà & Castellnou, 2009).

Per aquest motiu, al considerar la zona d'estudi com una zona d'alt risc d'incendi segons el Pla Territorial de Mallorca l'objectiu de la predicció del risc d'incendi seria determinar aquelles àrees propenses a sofrir un incendi forestal. De fet, des del 1987, a Espanya s'empra un índex de perill d'incendis derivat del índex dels Estats Units, el qual es va desenvolupar a partir del 1920 (ICONA, 1993). Aquest índex es realitza en funció de la humitat relativa, la velocitat i la direcció del vent.

De manera recent, s'han anat desenvolupant nombrosos projectes a nivell nacional encaminats en la prevenció de riscos, on tenen en compte molts de paràmetres. Alguns exemples com el projecte FIREMAP, el qual dur a terme un anàlisi integrat del risc d'incendis forestals mitjançant Teledetecció i Sistemes d'Informació Geogràfica. Un altre com METEOSIM, empresa especialitzada en serveis meteorològics sobre el risc d'incendi. Malauradament alguns d'aquests projectes es tracten de projectes desenvolupats a nivell teòric i alguns d'ells no han estat provats de manera operativa (De Vicente & López, 2012). Malauradament, deixant de banda els costos de computació, al darrere hi ha un fonts d'inversió prou significatiu.

---

<sup>5</sup> *Simulador que permet generar els contorns de propagació del foc, expressar variables de comportament davant les flames, representar l'existència i creixement de focus secundaris i incloure accions contra els incendis per part de medis terrestres i aeris.*

<sup>6</sup> *Plataforma de Windows que permet predir el comportament del foc en els incendis forestals amb fins estratègics de gestió i organització.*

És per això que, a part de tenir en compte els models sobre prevenció de risc d'incendi, s'han de tenir en compte altres mesures considerades importants. En primer lloc, l'accés a la zona d'estudi. A causa del turisme s'està augmentant el nombre de construccions dificultant l'accés en cas d'incendi. És a dir, durant l'incendi els bombers i els mitjans per extingir el foc varen tenir dificultat per poder accedir – hi ja que no varen poder accedir via aèria a causa de les ràfegues de vent. En segon lloc, tenint en compte que s'han produït al voltant de 4 incendis en els darrers 20 anys dins zona analitzada, a través del IV Pla General de Defensa contra incendis de les Illes Balears hauria de tenir altres vies de solució com la desforestació o canviar la localització del transformador i els cables elèctrics, mitjançant estudis d'impacte ambiental més exhaustius. Probablement col·locant mesures correctores per protegir millor el transformador i els cables elèctrics en cas de ràfegues de vent, minvarien el nombre d'incendis.

En quan a repoblació posterior a l'incendi, a causa de les precipitacions produïdes durant la redacció d'aquest treball d'investigació, s'està regenerant de manera satisfactòria. De fet, tan sols queda la zona del pinar situada a la part est i sud de la zona cremada, perquè quasi tota l'àrea afectada era bàsicament càrritx (Figura 14). Per desgràcia, el fet de considerar el càrritx un tipus de vegetació propensa als incendis convindria dur a terme una neteja a certa distància del transformador, encara que el càrritx sigui una planta que s'adapta prou bé a les exigències del foc (piròfila). No obstant, aquí és quan entren en joc les administracions tant locals com estatals, ja que la zona d'estudi és la Serra de Tramuntana i es tracta d'un espai natural protegit segons la UNESCO.



*Figura 14. Zona d'estudi presa a través d'una avioneta el dia 2/02/2018. Font: Pau Bennassar Llinàs, pilot aficionat.*

## **11. CONCLUSIONS**

El simple fet de produir – se un incendi, deixant de banda la problemàtica que poden causar dins la societat, s'han de tenir en compte una sèrie de factors per poder observar quines són les seves possibles causes i així determinar-ne la propagació.

En primer lloc, mitjançant el SPEI (Standardised Precipitation - Evapotranspiration Index) s'ha pogut observar com la conca Mediterrània i especialment les Illes Balears durant la darrera dècada està sotmesa a un període d'extrema sequera. Per aquest motiu, la climatologia adversa, en especial la sequera, no només augmenta el perill de incendi, sinó que pot ocasionar altres efectes adversos. És a dir, tenint en compte aquesta irregularitat en el clima mediterrani, la vegetació es torna més seca (estrés hídric del sòl) i determina la resposta d'aquesta davant del foc i altres perturbacions, propiciant la ignició del combustible, ja que està més susceptible.

D'altra banda, gràcies a les imatges satèl·lit, juntament amb les eines NBR, NDVI i MSI s'ha pogut comprovar quina ha estat la superfície cremada i el canvi i/o evolució espai – temporal d'alguns aspectes. Per un costat, el canvi de la vegetació i el comportament del foc damunt aquesta. Així doncs, s'ha analitzat quin ha estat l'estat de la vegetació i l'estrés hídric de la cobertura vegetal, tenint en compte el nivell de l'activitat vegetal de les plantes i la humitat aprofitable del sòl. Tot això a través de tres períodes temporals. Inicialment al 2009, quan a Mallorca hi havia un període d'humitat. Per això l'estat de la vegetació és prou favorable i disminueix l'inici d'un incendi. En segon lloc, al 2017, moment previ a l'incendi, per observar l'estrés hídric de les plantes i l'estat de la vegetació menys sana. Com a conseqüència, la vegetació és més sensible amb la propagació del foc. Finalment a l'any 2018 s'ha pogut veure com tant la vegetació com l'estrés de les plantes és alt i en alguns casos nul, a conseqüència de la seva combustió. A més a més, a través dels factors meteorològics extrems durant el mes de desembre i el moment que es va produir el incendi han ajudat per veure com des de les capes altes de l'atmosfera fins a la superfície s'han donat una sèrie de condicionants que han estat símptoma de detonant i causant de tal esdeveniment.

Per tant, retornant a la hipòtesi inicial, malgrat que s'hagi pogut corroborar com l'incendi del passat mes de desembre de 2017 al Port de Pollença s'inclou dins causa accidental; a través dels resultats obtinguts, s'ha pogut analitzar com al darrere hi ha hagut una sèrie de factors climàtics i meteorològics que han propiciat la propagació d'aquest incendi. Així, gràcies als objectius marcats, hem comprovat que les condicions climàtiques i meteorològiques que es venen donant en els darrers anys i durant el mes i moment que es va produir l'incendi, han estat factors clau en la propagació del mateix.

Per aquest motiu, mitjançant els resultats obtinguts, s'arriba a la conclusió que, si no s'haguessin produït aquests factors i/o causes (tant climàtiques com meteorològiques), molt possiblement l'incident del transformador i la caiguda del cable elèctric s'haurien quedat en només això. Igualment, si s'hagués produït probablement no s'hauria propagat de la manera que es va produir i hauria quedat amb un conat.

Així doncs, com a recomanació futura, caldria realitzar estratègies/accions de prevenció d'incendis com les citades anteriorment, tenint en compte les condicions climàtiques i adverses que succeeixen a Mallorca, ja que dins la zona d'estudi s'han produït al voltant de 4 incendis en 23 anys i a més es tracta d'un espai natural protegit.



## **12. AGRAÏMENTS**

La realització d'aquest treball no hauria estat possible sense l'ajuda i els coneixements del professor Enrique Morán Tejeda, així com del professor Jorge Lorenzo Lacruz. Per això, vull dedicar el meu agraïment per tot el que m'han ensenyat, transmès i per tota la seva dedicació, implicació i, en especial, paciència.

D'altra banda, m'agradaria donar les gràcies a la meva família, a la meva al·lota, als meus companys de classe, als meus companys de pis i als meus amics de confiança per l'ajuda i el suport que m'han donat.

### **13. BIBLIOGRAFIA**

- Arnol, A. T. (2005). Herramientas de evaluación de los factores meteorológicos que inciden en la evolución de los incendios forestales activos. Área de Defensa Contra Incendios Forestales. Dirección General para la Biodiversidad. Ministerio de Medio Ambiente.
- Beguería, S., Vicente-Serrano, S. M., Reig, F., & Latorre, B. (2014). Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *International Journal of Climatology*, 34(10), 3001-3023.
- Bermúdez, A. et al (2007). Empleo de una red de sensores en el reajuste de modelos de comportamiento del fuego en incendios forestales. 4ª Conferencia Internacional sobre Incendios Forestales.
- Bernat Ginard, J. (2016). Monitorización de la regeneración vegetal post – incendio a partir de imágenes Landsat OLI 8: el caso del incendio de Andratx de 2013. Trabajo de Final de Grado. Universidad de las Islas Baleares.
- Cacho Nerín, C. et al (2009). Análisis meteorológico y del comportamiento del fuego del gran incendio forestal de Zuera (Zaragoza) de 5 de agosto de 2008. 5º Congreso Forestal Español. Ref: 5CFE01 – 440. ISBN: 9788493685461.
- Carrasco Sánchez, J. (2017). Respuesta al estrés en plantas mediterráneas. Perspectiva frente al cambio climático. Trabajo Final de Grado. Universidad Complutense de Madrid.
- Chander, G. et al (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+ and EO – 1 ALI sensors. *ELSEVIER. Remote Sensing of Environment* (113). Pp 989 – 903.
- Chuvieco, E. (2008) Teledetección Ambiental. 3ª ed. Barcelona, España: Editorial Ariel.
- Decret 22/2015. BOIB núm. 056, el qual estableix IV Pla General de defensa contra incendis forestals de les Illes Balears.
- Delgado – Hernández, R. (2000). Caracterización mediante teledetección del régimen de incendios forestales en Cataluña (periodo 1975 – 98) y su influencia en los procesos de regeneración. Tesis doctoral. Centre de Recerca Ecològica i Aplicacions Forestals. Universidad Autónoma de Barcelona.
- Delgado Sánchez, A. (2017). Detección de Incendios: el caso del incendio de Órdena. Trabajo de Fin de Grado. Escuela Politécnica Superior de Edificación de Barcelona. Universidad de Barcelona.

- De Vicente, J & López, F. (2012). Diseño de un modelo de riesgo integral de incendios forestales mediante técnicas multicriterio y su automatización en sistemas de información geográfica. Una aplicación en la Comunidad Valenciana. Tesis Doctoral. Universidad politécnica de Madrid.
- Domenech Agenjo (2015). Incendis forestals a les Illes Balears: 25 anys de dades estadístiques per a la defensa integrada i la conservació del patrimoni natural. Llibre verd de protecció d'espècies a les Balears. ISBN: 9788460687238. Pp – 487 – 493.
- Domínguez Martín, S. (2008). La física de un índice predictivo de riesgo de incendios forestales. Grado de Doctor. Departamento de Física General y de la Atmósfera. Área de Tecnologías del Medio Ambiente. Universidad de Salamanca.
- Fernández García, F. (1996). Manual de Climatología Aplicada. Espacios y Sociedades. Editorial Síntesis. Madrid
- García de Pedraza, L. & García Vega, M. P. (1987). La meteorología y los incendios forestales. ISBN: 9434105543. Instituto Nacional de Meteorología.
- García – Mares, R., Calabuig E. L. (1990). La problemática de los incendios forestales y su incidencia sobre los robledales de quercus pirenaica en la provincia de León. Ecología, Universidad de León. Nº1 pp – 223 – 237.
- Goward, S. N. et al (1991). Normalized difference vegetation index measurements from the advanced very high resolution radiometer. EISEVIER. Remote Sensing of Environment. Vol. 35. Issues 2 – 3. Pp – 257 – 277.
- Hunt, J. & Rock, B. (1989). Detection of changes in leaf water content using Near- and Middle-Infrared reflectances. Elsevier. Vol. 30 Issue 1. Pp – 43 – 54.
- Key, C.H. & Benson, N. (1999). The Normalized Burned Ratio, a Landsat TM radiometric index of burn severity incorporating multi-temporal differencing. U.S. Geological Surve
- Martínez – Fernández, J., Ceballos, A. (2003). Temporal stability of soil moisture in a large-field experiment in Spain. Soil Science Society of America Journal, 67: 1647-1656.
- Martínez Ibarra, E. (2007). Incendios forestales en los municipios costeros alicantinos: Riesgo estadístico y relaciones con el tiempo y el clima. Investigaciones Geográficas. Pp - 89-102.
- Martínez Murillo, J.F. et al (2016). Resiliencia de la cubierta vegetal en un área de montaña mediterránea afectada por el fuego: el caso del incendio de Río Verde (Málaga, sur de España). Pirineos. Vol. 171 e024. ISSN-L: 0373-2568.

- Mauro, A.M. (1999). El comportamiento del viento en la troposfera media asociado a las configuraciones baricas y la modificación que introduce el efecto de sotavento en situaciones de incendios forestales. Proyecto Fondecyt nº 1990894Dpto. Ingeniería Geográfica. Universidad de Santiago de Chile.
- Milán, M. M., Estrela, M. J., Badenas, C.(1998): «Meteorological processes relevant to Forest fire dynamics on the Spanish Mediterranean coast», en Journal of Applied Meteorology, nº 37, pp. 83-100.
- Miller, R. C., 1967: Notes on analysis and severe storm forecasting procedures of the Military Weather Warning Center. Tech. Rept. 200(R), Headquarters, Air Weather Service, USAF, 94 pp.
- Montorio Llovería, R., et al. (2007): "Estudio de los procesos de regeneración vegetal postincendio en parcelas experimentales mediante radiometría del campo." Cuadernos de Investigación Geográfica.Universidad de La Rioja. Nº 33. págs. 59-84.
- Pausas, J.G. 2004. La recurrencia de incendios en el monte mediterráneo. In: Vallejo, R. (ed.). Avances en el estudio de la gestión del monte mediterráneo. CEAM.
- Rifà, A. & Castellnou, M. (2009). El modelo de extinción de incendios forestales catalán. International Wildfire Fire Conference. Thematic Session Nº2.
- Sadeghi, M. et al (2017). The optical trapezoid model: A novel approach to remote sensing of soil moisture applied to Sentinel-2 and Landsat-8 observations. ELSEVIER. Remote Sensing of Environment (198). Pp – 52 – 68.
- San Miguel – Ayanz et al (2002). Towards a coherent forest fire information system in Europe: The European Forest Fire Information System (EFFIS), Forest Fire Research & Wildland Fire Safety. (D.X. Viegas Ed.) Rotterdam, Millpress
- Torres Rojo, J. et al. (2007). Índice de peligro de incendios forestales de largo plazo. *Agrociencia*, 41 (6), pp - 663-674.
- Vicente-Serrano SM, Beguera S, López-Moreno JI. 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index – SPEI. J. Clim. 23: 1696–1718.
- Welikhe, P. et al (2017). Estimation of soil moisture percentage using Landsat – based Moisture Stress Index. Journal of Remote Sensing & GIS (6:2). DOI: 10.4172/2469-4134.1000200.
- Zúñiga López, I. & Crespo del Arco, E. (2010). Meteorología y Climatología. Universidad Nacional de Educación a Distancia. Madrid.

## **14. FONTS ELECTRÒNIQUES**

- AEMET. Estadística de les variables meteorològiques. Consultat el 1/03/2018. Enllaç: [http://www.aemet.es/es/datos\\_abiertos/estadisticas/estadistica\\_meteorofenologicas](http://www.aemet.es/es/datos_abiertos/estadisticas/estadistica_meteorofenologicas)
- Davison, M. & Gálvez, J. (2016). Índices de estabilidad. WPC international desks. [Consulta en línia 25/04/2018]. Enllaç: [http://ftp.wpc.ncep.noaa.gov/mike/CHILE\\_2016/Presentations-PDF/3\\_%C3%8Dndices%20de%20Estabilidad.pdf](http://ftp.wpc.ncep.noaa.gov/mike/CHILE_2016/Presentations-PDF/3_%C3%8Dndices%20de%20Estabilidad.pdf)
- Fic (fundación para la investigación del clima). Consultat el 15/05/2018. Enllaç: <https://www.ficlima.org/incendios-forestales/>
- IBANAT (2018), resum estadístic incendis forestals 2017. [Consulta en línia 8/04/2018] Enllaç: [www.caib.es/sites/xarxaforestal/ca/d/estadistica\\_dincendis\\_2017](http://www.caib.es/sites/xarxaforestal/ca/d/estadistica_dincendis_2017)
- Meteosim. Consultat el 1/06/2018. Enllaç: <https://www.meteosim.com/es/>
- Organització Mundial de Meteorologia. Manual d'indicadors i índex de sequera, 2016. [Consulta en línia: 23/03/2018]. Enllaç: [http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP\\_Manual-de-indicadores\\_2016](http://www.droughtmanagement.info/literature/WMO-GWP_Manual-de-indicadores_2016)
- Sánchez – Laulhé Ollero, J.M. (2015). La influencia de la meteorología en el comportamiento de los incendios forestales en la provincia de Málaga y en las técnicas de extinción. Aemet. Reunión Internacional FuegoRed. [Consultat en línia el 25/05/2018]. Enllaç: [https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal\\_web/web/temas\\_ambientales/incendios\\_forestales/extincion/La\\_influencia\\_de\\_la\\_meteorologia\\_incendios\\_fuegored2.pdf](https://www.juntadeandalucia.es/medioambiente/portal_web/web/temas_ambientales/incendios_forestales/extincion/La_influencia_de_la_meteorologia_incendios_fuegored2.pdf)
- Stability of the Atmosphere. Agricultural Weather Center. Consultat el 18/04/2018. Enllaç: [http://weather.uky.edu/about\\_totl.htm](http://weather.uky.edu/about_totl.htm)
- Urbanski, J. (2014). Integration of GEOBIA with GIS for semiautomatic land cover mapping from Landsat 8 imagery. University of Gdansk, Poland. [Consulta en línia 2/04/2018]. Enllaç: <http://cgis.oig.ug.edu.pl/CentrumGIS/GEOBIA%20in%20ArcGIS.pdf>
- Visor web Pla Territorial de Mallorca. [Consulta en línia el 1/06/2018]. Enllaç: <http://www.conselldemallorca.net/sit/ptm/>