



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ANÁLISIS DE LAS SEÑALES ELECTROFISIOLÓGICAS EN
Pinus halepensis Mill. COMO BASE A SU APLICACIÓN EN
SENSORES INALÁMBRICOS PARA LA PREVENCIÓN DE
INCENDIOS FORESTALES

TESIS DOCTORAL

AUTOR:

Rodolfo Zapata Zapata

DIRECTORES:

Prof. Dr. José Vicente Oliver Villanueva

Prof. Dr. Lenin G. Lemus Zúñiga

JUNIO 2023

I. AGRADECIMIENTOS

A mi director de tesis, el profesor Dr. José Vicente Oliver, por el gran conocimiento que me ha aportado y por la confianza que ha depositado en mí desde el primer momento que tuve la suerte de ser su alumno ya en 2006.

A mi co-director, el profesor Dr. Lenin Lemus, por guiarme y ayudarme durante todo este camino que ha sido mi tesis doctoral. Aunque nos conocimos más recientemente, me ofreció su amistad desde el primer minuto.

A mis compañeros y amigos, el Dr. Miguel Mateo y el Dr. Jorge Luzuriaga agradecerles la ayuda y las ideas aportadas.

Agradecer de forma especial al Dr. David Fuente el esfuerzo destinado a este trabajo, concretamente en el tratamiento de datos y análisis estadístico.

A Juan Antonio Moreno por su trabajo de campo, y al Dr. Edgar Lorenzo, a la Dra. Lourdes Castellblanque, al Dr. David Vinué y Aroa Marco, por guiarme por el laberinto administrativo universitario.

Al profesor Dr. Javier Urchueguía, y el resto del excelente equipo multidisciplinar del Grupo de Investigación ICTvsCC del Instituto ITACA de la UPV por su fundamental colaboración.

Y por supuesto a toda mi familia por aguantarme, ayudarme y empujarme a continuar siempre hacia delante.

Sin vosotros, nada de esto hubiera sido posible.

II. RESUMEN

Los bosques de pino carrasco o *Pinus halepensis*, como ecosistemas típicos mediterráneos, están sometidos a periodos con condiciones meteorológicas extremas de altas temperaturas y estrés hídrico, sobre todo en los veranos. Estas condiciones extremas provocan escenarios de alto riesgo de incendios forestales. Junto a este riesgo inherente en los ecosistemas mediterráneos, el actual contexto de emergencia climática conlleva un aumento de las temperaturas medias y máximas, un cambio de los patrones de precipitación y un aumento de la ocurrencia de estos eventos atmosféricos extremos combinados, lo que genera condiciones ideales para que se abran cada vez más frecuentes y mayores ventanas meteorológicas con biomasa muy seca, con el consiguiente mayor riesgo de propagación de grandes incendios en masas forestales mucho más vulnerables. Estos grandes incendios forestales pueden llegar a proporciones catastróficas, lo que puede ocasionar no solo pérdida de biodiversidad de flora y fauna, cambios en el ciclo del agua, erosión del suelo y desertificación, sino también importantes pérdidas económicas, emisiones incontroladas de CO₂, como principal gas de efecto invernadero (GEI), y también de gases y partículas contaminantes con graves consecuencias en la salud y el bienestar de las personas.

En el contexto actual de cambio climático global, y debido a los modestos avances en materia de reducción de emisiones de GEI, la adaptación de territorios especialmente vulnerables, como los de la cuenca del Mediterráneo, y la gestión forestal sostenible se presentan como un reto para contribuir de forma activa a la mitigación y adaptación al cambio climático. Para ello, la investigación forestal en Europa se está centrando en desarrollar herramientas y modelos de apoyo a la toma de decisiones en base a diferentes variables ambientales y biológicas que nos permitan conocer de forma lo más precisa posible el estado del bosque y el nivel riesgo en el que se encuentra ante este tipo de perturbaciones.

En este contexto, una de las disciplinas de conocimiento científico y tecnologías derivadas que apenas se han investigado hasta la fecha en relación con el riesgo de incendios forestales es la electrofisiología vegetal. Por ello, en la presente tesis se expone la evaluación experimental de las señales eléctricas vegetales (corriente eléctrica de cortocircuito *ISC* y tensión eléctrica *V*) como posibles variables equivalentes del estado fenológico en los modelos de gestión, como base para el futuro desarrollo de sistemas de redes de sensores inalámbricos, todo ello a través del análisis de las características estáticas y dinámicas de las señales electrofisiológicas de la principal especie arbórea de la cuenca mediterránea occidental, el *Pinus halepensis*.

Para dar respuesta al principal objetivo definido, la tesis se ha estructurado en tres capítulos, siguiendo cada uno de ellos el método científico.

En el primer capítulo se analiza la evaluación de algunos de los factores estáticos más significativos que influyen en el patrón de distribución de las señales electrofisiológicas del *Pinus halepensis*, principalmente la edad del árbol, la metodología de medida y toma de datos, así como la colocación de los electrodos en altura del fuste y en orientación cardinal. Tras un diseño muestral adecuado, los resultados demuestran que la madurez del árbol influye directamente en la tensión eléctrica determinada por la tensión medida, siendo los árboles jóvenes los que presentan una mayor amplitud en la señal eléctrica, la cual se muestra uniforme en el árbol, siendo independiente de la colocación de los electrodos en altura y en orientación cardinal.

En el segundo capítulo se analiza la evolución temporal de la señal eléctrica registrada, tanto diaria como anual abarcando periodos temporales estacionales y condiciones meteorológicas diferentes. Se han analizado en detalle las oscilaciones de las señales electrofisiológicas entre el día y la noche. Además, también se ha estudiado la influencia de los fenómenos meteorológicos puntuales, principalmente las precipitaciones y las tormentas eléctricas, sobre los valores de las señales electrofisiológicas. Los resultados obtenidos demuestran que las señales electrofisiológicas presentan valores significativamente más altos y de mayor amplitud durante los periodos más húmedos con temperaturas moderadas, mientras que las señales son representativamente mucho más bajas (incluidas medidas de ISC nula), durante los periodos con mayor estrés vegetativo del año, principalmente a mediados del verano, con muy altas temperaturas y periodos prolongados de sequía. La metodología aplicada y los resultados obtenidos en este capítulo de la tesis demuestran que las señales electrofisiológicas (especialmente la tensión eléctrica) pueden ser consideradas un indicador del estado fisiológico de los árboles en situaciones de estrés vegetativo.

Finalmente, en el tercer capítulo de la tesis se analiza la evaluación de las señales electrofisiológicas como variables a incluir en los modelos de gestión del riesgo de incendio forestal, como complemento a la variable más utilizada hasta el momento, que es el contenido de humedad del combustible vivo (LFMC). En cuanto a esta última variable, los resultados obtenidos nos han permitido demostrar que no existen diferencias significativas entre el LFMC de las distintas fracciones vivas de las ramas del *Pinus halepensis* (base y mitad de la rama y material fino de ramillas y acículas del combustible vivo), por lo que esta variable podría ser tomada en cualquiera de las fracciones de las ramas vivas en los diferentes periodos de riesgo de incendio, incluso en épocas de sequía con estrés hídrico y temperaturas muy elevadas. Además, los resultados también nos han permitido demostrar que el LFMC del *Pinus halepensis* no muestra variaciones estacionales significativas bajo la influencia de factores extremos de riesgo de incendio, mientras que las diferencias registradas en las señales electrofisiológicas (sobre todo la tensión) muestran oscilaciones con variaciones significativas, que están fuertemente correlacionadas con los periodos de condiciones

meteorológicas extremadamente favorables para los incendios forestales. Finalmente, también se ha podido demostrar una muy alta correlación entre las tensiones medidas y los principales índices de riesgo de incendio utilizados por las agencias de emergencias y los dispositivos de lucha frente a los incendios forestales, principalmente el *Fire Weather Index* (FWI).

Con todos los resultados obtenidos en los tres capítulos de la tesis, podemos concluir finalmente que las variaciones en las señales electrofisiológicas están estrechamente relacionadas con el estado fenológico de los *Pinus halepensis* y con el riesgo de incendio forestal. Lo que abre la posibilidad de una monitorización *in situ* de las masas forestales en las que domina esta especie, de forma mínimamente invasiva, mediante sensores inalámbricos que permitan establecer umbrales y señales de alarma en función de los valores de tensión y su evolución, lo que sería fácilmente integrable en los sistemas de modelización y gestión preventiva de los incendios forestales en los ecosistemas mediterráneos.

III. ABSTRACT

Aleppo pine or *Pinus halepensis* forests, as typical Mediterranean ecosystems, are subjected to periods of extreme weather conditions of high temperatures and water stress, especially in the summers. These extreme conditions cause high wildfire risk scenarios. In addition to this inherent risk in Mediterranean ecosystems, the current context of climatic emergency entails an increase in average and maximum temperatures, a change in precipitation patterns and an increase in the occurrence of these combined extreme weather events, which generates ideal conditions for more frequent and larger weather windows with very dry biomass, with the consequent increased risk of propagation of large fires in much more vulnerable forest stands. These large forest fires can reach catastrophic proportions, which can cause not only loss of biodiversity of flora and fauna, changes in the water cycle, soil erosion and desertification, but also significant economic losses, uncontrolled emissions of CO₂ as the main greenhouse gas (GHG) and also of polluting gases and particles with serious consequences on people's health and well-being.

In the current context of global climate change, and due to the modest progress made in reducing GHG emissions, the adaptation of particularly vulnerable territories, such as those in the Mediterranean basin, and sustainable forest management are presented as a challenge to actively contribute to climate change mitigation and adaptation. To this end, forestry research in Europe is focusing on developing tools and models to support decision making based on different environmental and biological variables that allow us to know as precisely as possible the state of the forest and the level of risk to which it is exposed to this type of disturbance.

In this context, one of the disciplines of scientific knowledge and derived technologies that have poorly or even not been investigated to date in relation to forest fire risk is plant electrophysiology. For this reason, this PhD thesis presents the experimental evaluation of plant electrical signals (electrical shortcircuit current *ISC* and voltage *V*) as possible equivalent variables of the phenological state in management models, as a basis for the future development of wireless sensor network systems, through the analysis of the static and dynamic characteristics of the electrophysiological signals of the main tree species of the western Mediterranean basin, *Pinus halepensis*.

In order to respond to the main objective defined, the thesis has been structured in three chapters, each of them following the scientific method.

The first chapter discusses the evaluation of some of the most significant static factors that influence the distribution pattern of electrophysiological signals of *Pinus halepensis*, mainly the age of the tree, the methodology of measurement and data

collection, as well as the placement of the electrodes at the height of the stem and branches and in cardinal orientation. After an adequate sampling design, the results show that the age of the tree directly influences the electrical voltage determined by the measured voltage, being the young trees those that present a greater amplitude in the electrical signal, which is uniform in the tree, being independent of the placement of the electrodes in height and in cardinal orientation.

The second chapter analyzes the temporal evolution of the recorded electrical signal, both daily and annual, covering seasonal time periods and different meteorological conditions. Day-night oscillations of electrophysiological signals have been analyzed in detail. In addition, the influence of punctual meteorological phenomena, mainly precipitation and thunderstorms, on the values of electrophysiological signals has also been studied. The results obtained show that the electrophysiological signals present significantly higher values and greater amplitude during the wettest periods with moderate temperatures, while the signals are representatively much lower (including measurements of zero *ISC*), during the periods with greater vegetative stress of the year, mainly in mid-summer, with very high temperatures and prolonged periods of drought. The methodology applied and the results obtained in this chapter of the thesis demonstrate that electrophysiological signals (especially voltage) can be considered an indicator of the physiological state of trees in situations of vegetative stress.

Finally, the third chapter of the thesis analyzes the evaluation of electrophysiological signals as variables to be included in wildfire risk management models, as a complement to the most widely used variable to date, which is the live fuel moisture content (LFMC). Regarding this last variable, the results obtained have allowed us to demonstrate that there are no significant differences between the LFMC of the different live fractions of the branches of *Pinus halepensis* (base and middle of the branch and fine material of twigs and needles of the live fuel), so that this variable could be taken in any of the fractions of the live branches in the different periods of fire risk, even in times of drought with water stress and very high temperatures. Furthermore, the results have also allowed us to demonstrate that the LFMC of *Pinus halepensis* does not show significant seasonal variations under the influence of extreme fire risk factors, while the differences recorded in electrophysiological signals (especially voltage) show oscillations with significant variations, which are strongly correlated with periods of extremely favorable meteorological conditions for forest fires. Finally, it has also been possible to demonstrate a very high correlation between the measured voltages and the main fire risk indices used by emergency agencies and forest fire fighting devices, mainly the Fire Weather Index (FWI).

With all the results obtained in the three chapters of the PhD thesis, we can finally conclude that variations in electrophysiological signals are closely related to the

phenological state of *Pinus halepensis* and to the risk of forest fire. This opens the possibility of in situ monitoring of forest stands dominated by this species, in a minimally invasive way, by means of wireless sensors that allow establishing thresholds and alarm signals according to voltage values and their evolution, which could be easily integrated in the systems of modeling and preventive management of forest fires in Mediterranean ecosystems.

IV. RESUM

Els boscos de pi blanc o *Pinus halepensis*, com a ecosistemes típics mediterranis, estan sotmesos a períodes amb condicions meteorològiques extremes d'altres temperatures i estrès hídric, sobretot als estius. Aquestes condicions extremes provoquen escenaris de risc elevat d'incendis forestals. Juntament amb aquest risc inherent als ecosistemes mediterranis, l'actual context d'emergència climàtica comporta un augment de les temperatures mitjanes i màximes, un canvi dels patrons de precipitació i un augment de l'ocurrència d'aquests esdeveniments atmosfèrics extrems combinats, cosa que genera condicions ideals perquè s'obrin cada vegada més freqüents i més grans finestres meteorològiques amb biomassa molt seca, amb el consegüent risc de propagació de grans incendis en masses forestals molt més vulnerables. Aquests grans incendis forestals poden arribar a proporcions catastròfiques, cosa que pot ocasionar no només pèrdua de biodiversitat de flora i fauna, canvis en el cicle de l'aigua, erosió i desertificació, sinó també importants pèrdues econòmiques, emissions incontrolades de CO₂, com a principal gas d'efecte hivernacle (GEH), i també de gasos i partícules contaminants amb greus conseqüències en la salut i el benestar de les persones.

En el context actual de canvi climàtic global, i a causa dels modestos avenços en matèria de reducció d'emissions de GEH, l'adaptació de territoris especialment vulnerables, com els de la conca de la Mediterrània, i la gestió forestal sostenible es presenten com a repte per a contribuir de manera activa a la mitigació i adaptació al canvi climàtic. Per això, la investigació forestal a Europa s'està centrant a desenvolupar eines i models de suport a la presa de decisions sobre la base de diferents variables ambientals i biològiques que ens permeten conèixer de manera tan precisa com siga possible l'estat del bosc i el nivell de risc en què es troba davant d'aquest tipus de pertorbacions.

En aquest context, una de les disciplines de coneixement científic i tecnologies derivades que tot just s'han investigat fins ara en relació amb el risc d'incendis forestals, és l'electrofisiologia vegetal. Per això, en aquesta tesi s'exposa l'avaluació experimental dels senyals elèctrics vegetals (corrent de curtcircuit ISC i voltatge V) com a possibles variables equivalents de l'estat fenològic en els models de gestió, com a base per al futur desenvolupament de sistemes de xarxes de sensors inalàmbrics, tot això a través de l'anàlisi de les característiques estàtiques i dinàmiques dels senyals electrofisiològics de la principal espècie arbòria de la conca mediterrània occidental, el *Pinus halepensis*.

Per donar resposta al principal objectiu definit, la tesi s'ha estructurat en tres capítols, seguint cadascun el mètode científic.

Al primer capítol s'analitza l'avaluació d'alguns dels factors estàtics més significatius que influeixen en el patró de distribució dels senyals electrofisiològics del *Pinus halepensis*, principalment l'edat de l'arbre, la metodologia de mesura i presa de dades, així com la col·locació dels elèctrodes en altura del fust i en orientació cardinal. Després d'un disseny mostral adequat, els resultats demostren que la maduresa de l'arbre influeix directament en la tensió elèctrica determinada pel voltatge mesurat, sent els arbres joves els que presenten una major amplitud del senyal elèctric, la qual es mostra uniforme a l'arbre, sent independent de la col·locació dels elèctrodes en altura i en orientació cardinal.

En el segon capítol s'analitza l'evolució temporal del senyal elèctric registrat, tant diari com anual, abastant períodes temporals estacionals i condicions meteorològiques diferents. S'han analitzat detalladament les oscil·lacions entre el dia i la nit dels senyals electrofisiològics. A més, també s'ha estudiat la influència dels fenòmens meteorològics puntuals, principalment les precipitacions i les tempestes elèctriques sobre els valors dels senyals electrofisiològics. Els resultats obtinguts demostren que els senyals electrofisiològics presenten valors significativament més alts i de més amplitud durant els períodes més humits amb temperatures moderades, mentre que els senyals són representativament molt més baixes (incloses mesures ISC nul), durant els períodes amb més estrès vegetatiu de l'any, principalment a mitjans de l'estiu, amb temperatures molt altes i períodes prolongats de sequera. La metodologia aplicada i els resultats aconseguits en aquest capítol de la tesi demostren que els senyals electrofisiològics (especialment la tensió elèctrica o voltatge) es poden considerar un indicador de l'estat fisiològic dels arbres en situacions d'estrès vegetatiu.

Finalment, al tercer capítol de la tesi s'analitza l'avaluació dels senyals electrofisiològics com a variables a incloure en els models de gestió del risc d'incendi forestal, com a complement a la variable més utilitzada fins ara, que és el contingut d'humitat del combustible viu (LFMC). Pel que fa a aquesta última variable, els resultats aconseguits ens han permès demostrar que no hi ha diferències significatives entre l'LFMC de les diferents fraccions vives de les branques del *Pinus halepensis* (base i meitat de la branca i material fi de branquillons i acícules del combustible viu), per la qual cosa aquesta variable podria ser presa en qualsevol de les fraccions de les branques vives en els diferents períodes de risc d'incendi, fins i tot en èpoques de sequera amb estrès hídric i temperatures molt elevades. A més, els resultats també ens han permès demostrar que l'LFMC del *Pinus halepensis* no mostra variacions estacionals significatives sota la influència de factors extrems de risc d'incendi, mentre que les diferències registrades als senyals electrofisiològics (sobretot el voltatge) mostren oscil·lacions amb variacions significatives, que estan fortament correlacionades amb els períodes de condicions meteorològiques extremadament favorables per als incendis forestals. Finalment, també s'ha pogut demostrar una correlació molt alta entre els voltatges mesurats i els principals índexs de risc d'incendi utilitzats per les

agències d'emergències i els dispositius de lluita davant dels incendis forestals, principalment el *Fire Weather Index* (FWI).

Amb tots els resultats obtinguts als tres capítols de la tesi, podem concloure finalment que les variacions als senyals electrofisiològics estan estretament relacionades amb l'estat fenològic dels *Pinus halepensis* i amb el risc d'incendi forestal. Això obre la possibilitat d'una monitorització in situ de les masses forestals en què domina aquesta espècie, de forma mínimament invasiva, mitjançant sensors inalàmbrics que permeten establir llindars i senyals d'alarma en funció dels valors de voltatge i la seua evolució, cosa que seria fàcilment integrable en els sistemes de modelització i gestió preventiva dels incendis forestals als ecosistemes mediterranis.

V. CONTENIDOS

I. AGRADECIMIENTOS.....	III
II. RESUMEN	IV
III. ABSTRACT	VII
IV. RESUM	X
V. CONTENIDOS	XIII
VI. LISTA DE FIGURAS.....	XVI
VII. LISTA DE TABLAS.....	XIX
VIII. INDICE DE ABREVIATURAS	XX
1. INTRODUCCIÓN	- 1 -
1.1. Cambio climático y riesgos forestales	- 1 -
1.1.1. Emergencia climática e impacto sobre ecosistemas forestales mediterráneos.....	- 2 -
1.1.2. Incendios forestales: impactos sociales, económicos y medioambientales..	- 6 -
1.2. Estado del arte.....	- 17 -
1.2.1. Fisiología del árbol en situaciones de estrés hídrico.....	- 17 -
1.2.2. Tecnologías avanzadas para la evaluación y monitorización del comportamiento fisiológico de los árboles ante el riesgo de incendios forestales.....	- 18 -
1.2.3. Avances en electrofisiología aplicada	- 21 -
1.3. Justificación de la investigación	- 24 -
2. OBJETIVOS	- 26 -
2.1. Objetivo general	- 26 -
2.2. Objetivos específicos	- 26 -
2.3. Objetivos operativos	- 27 -
3. ESTRUCTURA DE LA TESIS.....	- 28 -
4. CAPÍTULO 1.....	- 30 -
4.1. Introducción	- 31 -
4.2. Material y métodos	- 34 -
4.2.1. Selección de la parcela de estudio	- 34 -
4.2.2. Selección de árboles representativos	- 35 -

4.2.3. Equipos de medición	- 37 -
4.2.4. Variables electrofisiológicas	- 38 -
4.2.5. Colocación de electrodos y medición.....	- 39 -
4.2.6. Condiciones experimentales	- 40 -
4.2.7. Análisis estadístico	- 41 -
4.3. Resultados	- 42 -
4.3.1. Influencia de la edad del árbol	- 42 -
4.3.2. Influencia de la altura.....	- 43 -
4.3.3. Influencia de la orientación.....	- 46 -
4.3.4. Configuración óptima de los electrodos	- 47 -
4.4. Discusión.....	- 49 -
4.5. Conclusiones.....	- 51 -
5. CAPÍTULO 2.....	- 52 -
5.1. Introducción	- 53 -
5.2. Material y métodos	- 56 -
5.2.1. Selección de especies y bosques representativos	- 56 -
5.2.2. Electrodos.....	- 57 -
5.2.3. Medidas para la evolución a largo plazo: estacionalidad anual.....	- 58 -
5.2.4. Medidas para la evolución a corto plazo: estacionalidad diaria.....	- 60 -
5.3. Resultados	- 64 -
5.3.1. Evolución a largo plazo.....	- 64 -
5.3.2. Relación entre la señal eléctrica y las variables atmosféricas	- 66 -
5.3.3. Evolución a corto plazo: estacionalidad diaria.....	- 69 -
5.4. Discusión.....	- 73 -
5.4.1. Evolución a largo plazo.....	- 73 -
5.4.2. Evolución a corto plazo: estacionalidad diaria.....	- 74 -
5.5. Conclusiones.....	- 76 -
6. CAPÍTULO 3.....	- 77 -
6.1. Introducción	- 78 -
6.2. Materiales y métodos.....	- 82 -
6.2.1. Diseño de la investigación	- 82 -
6.2.2. Selección de la muestra.....	- 82 -

6.2.3. Selección de árboles muestra	- 85 -
6.2.4. Procedimientos de medición.....	- 85 -
6.2.5. Series temporales meteorológicas.....	- 89 -
6.2.6. Evaluación del riesgo de incendios forestales.....	- 89 -
6.3. Resultados y discusión.....	- 90 -
6.3.1. Comparación entre el contenido de humedad en diferentes fracciones de ramas vivas.....	- 90 -
6.3.2. Variabilidad estacional del contenido de humedad del combustible vivo ..	- 92 -
6.3.3. Variabilidad estacional de las señales eléctricas en los árboles	- 93 -
6.3.4. Relación entre la humedad del combustible vivo y las señales eléctricas...	- 94 -
6.3.5. Relación entre las señales eléctricas y el riesgo de incendios forestales	- 97 -
6.4. Conclusiones.....	- 101 -
7. CONCLUSIONES GENERALES	- 103 -
8. FUTURAS INVESTIGACIONES	- 107 -
9. TRANSFERENCIA DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN	- 109 -
9.1.1. Publicaciones científicas de impacto.....	- 109 -
9.1.2. Comunicaciones en congresos científicos.....	- 110 -
10. BIBLIOGRAFÍA	- 111 -
11. ANEXO I	- 143 -
12. ANEXO II	- 153 -
13. ANEXO III	- 167 -

VI. LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Aumento de la temperatura en superficie a escala mundial por encima de los niveles de 1850 a 1900. - 1 -*
- Figura 2. Número de días al año en situación de ola de calor en España por décadas desde 1975..... - 4 -*
- Figura 3. Incremento de la cubierta forestal en España..... - 9 -*
- Figura 4. Distribución de población en España (2018). - 13 -*
- Figura 5: Localización de la zona de estudio: (A) vista panorámica del rodal en estudio, (B) distanciamiento de los árboles en el rodal de muestra. - 35 -*
- Figura 6. Equipo utilizado para la medición de las señales eléctricas (a) tornillo de 70 mm como electrodo, (b) electrodo para referencia a tierra..... - 37 -*
- Figura 7. Colocación de los electrodos mediante brújula (izquierda), identificación de los árboles y ubicación radial de los electrodos (centro), electrodos separados longitudinalmente (derecha). - 39 -*
- Figura 8. Modos de colocación de los electrodos (izquierda) mediciones referenciadas a tierra, (derecha) configuración bipolar. - 40 -*
- Figura 9. Boxplots que presentan la dispersión de los datos para las mediciones de 24h en árboles jóvenes, viejos y muertos. Las tensiones medias V medidas difirieron significativamente según la edad del árbol, mostrando los árboles jóvenes valores mucho más altos que los individuos más maduros. - 43 -*
- Figura 10. Mediciones referenciadas a tierra para tensión V y corriente de cortocircuito ISC considerando la altura en el árbol. - 44 -*
- Figura 11. Mediciones de tensión V bipolar considerando la altura en el árbol. - 45 -*
- Figura 12. Valores medios de tensión V y corriente de cortocircuito ISC en función de la orientación cardinal. - 46 -*

<i>Figura 13. Diferencias significativas entre las configuraciones bipolar y referenciada a tierra en términos de tensión V (izquierda) e ISC (derecha) (valor $p < 0,0001$).....</i>	<i>- 48 -</i>
<i>Figura 14. Equipo de medición.</i>	<i>- 59 -</i>
<i>Figura 15. Distribución de los árboles seleccionados en la parcela de investigación. -</i>	<i>60 -</i>
<i>Figura 16. Emplazamiento de adquisición de datos a corto plazo en un árbol seleccionado. Visión cercana de la cápsula estanca (A). Visión general de la instalación (B).....</i>	<i>- 62 -</i>
<i>Figura 17. Diagrama del circuito de medición a través del shunt.</i>	<i>- 63 -</i>
<i>Figura 18. Evolución temporal de la tensión V (a) y la ISC (b) durante el experimento a largo plazo, expresada como valor medio de todos los árboles. También se representan los valores máximos y mínimos (punteados). Las líneas verticales discontinuas.....</i>	<i>- 65 -</i>
<i>Figura 19. Relación entre la tensión media V y la corriente de cortocircuito ISC de todos los árboles para la campaña a largo plazo.....</i>	<i>- 66 -</i>
<i>Figura 20. Resultado de la correlación de Spearman. Los valores dentro de un recuadro coloreado corresponden a una correlación estadísticamente significativa diferente de $R^2 = 0$, con un nivel de significación $\alpha = 0,05$.....</i>	<i>- 67 -</i>
<i>Figura 21. Evolución temporal de la tensión V (A) y de la corriente de cortocircuito ISC (B) durante el experimento a largo plazo, expresada como valor medio de todos los árboles. También se muestra la cantidad de precipitaciones. Los colores del fondo representan la estación astronómica correspondiente.</i>	<i>- 68 -</i>
<i>Figura 22. Evolución temporal de la temperatura y la tensión V medio de todos los árboles durante el experimento a largo plazo.....</i>	<i>- 69 -</i>
<i>Figura 23. Evolución de la tensión V para los diferentes experimentos a corto plazo. Los eventos relacionados con cambios de tensión se indican con flechas. A) del 26 de abril al 1 de mayo de 2019. B) del 29 de junio al 4 de julio de 2019. C) del 15 al 20 de junio de 2020. D) del 6 al 12 de marzo de 2021.</i>	<i>- 71 -</i>
<i>Figura 24. Evolución de la ISC durante dos experimentos diferentes a corto plazo. La evolución de la ISC (A) y (B) corresponden al experimento mostrado en (C) y (D) de la Figura 18, respectivamente.</i>	<i>- 72 -</i>

<i>Figura 25. Vista de la parcela de estudio (agosto de 2021).</i>	- 84 -
<i>Figura 26. Electrodo de árbol (A), colocación del electrodo de tierra (B), disposición del equipo de medición (C).</i>	- 87 -
<i>Figura 27. Fracciones de muestreo para medición del contenido de humedad (MC).</i> -	88 -
<i>Figura 28. Comparación entre el contenido de humedad en diferentes fracciones de la rama de Pinus halepensis de mayo a octubre de 2021: base de la rama (BBMC%, mitad de la rama (BMMC%) y combustible vivo fino (LFMC%).</i>	- 90 -
<i>Figura 29. Análisis residual estandarizado entre BBMC%, BMMC% y LFMC% para el periodo total (a) y residual estandarizado frente al total de observaciones (b).</i>	- 91 -
<i>Figura 30. Variabilidad estacional del contenido de humedad de la primera rama viva (BBMC%, BMMC% y LFMC%) en comparación con la tensión V durante las 24 semanas desde finales de primavera hasta principios de otoño de 2021.</i>	- 92 -
<i>Figura 31. Contenido de humedad (BBMC%, línea morada y LFMC%, línea verde) frente a las precipitaciones acumuladas semanalmente (columna azul) y la humedad relativa (línea marrón claro) durante las 24 semanas de estudio.</i>	- 95 -
<i>Figura 32. Contenido de humedad (BBMC%, línea morada y LFMC%, línea verde) frente a las temperaturas máximas (línea azul oscuro) y mínimas (línea azul claro) diarias.</i>	- 95 -
<i>Figura 33. Valores medios de tensión V (línea azul) y BBMC% (línea rosa) frente a la clasificación FWI de las mediciones según los criterios FWI durante las 24 semanas de estudio (color de fondo).</i>	- 98 -
<i>Figura 34. Valores medios de corriente de cortocircuito ISC (μA marcado en la figura con una línea gris oscuro) y BBMC% (línea rosa) frente a la clasificación FWI de las mediciones según los criterios FWI durante las 24 semanas de estudio (color de fondo).</i>	- 98 -
<i>Figura 35. Valores de tensión V para todos los días medidos desde mayo de 2018 hasta octubre de 2021 clasificados por categorías de FWI (riesgo de incendio forestal bajo, alto, muy alto y extremo).</i>	- 99 -

VII. LISTA DE TABLAS

- Tabla 1. Parámetros dendrométricos del rodal seleccionado para los ensayos: diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total del árbol (h_t). - 36 -*
- Tabla 2. Resumen de observaciones utilizando diferentes configuraciones sobre grupos de árboles maduros y jóvenes, voltios como unidad de medida. - 42 -*
- Tabla 3. Media estadística y varianza de las mediciones referenciadas a tierra para la tensión V y la corriente de cortocircuito ISC considerando la altura en el árbol. - 44 -*
- Tabla 4. Media estadística y varianza de las mediciones de tensión V y corriente de cortocircuito ISC bipolar considerando la altura al árbol. - 46 -*
- Tabla 5. Media estadística y varianza de las mediciones de tensión V referenciadas a tierra considerando la orientación en el árbol. - 47 -*
- Tabla 6. Calendario de experimentos a corto plazo. - 61 -*
- Tabla 7. Propiedades del suelo en la parcela de estudio. - 84 -*
- Tabla 8. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) entre BBMC%, BMMC% y LFMC%. - 91 -*
- Tabla 9. Estadísticas descriptivas de los resultados de tensión (V) y de corriente de cortocircuito (ISC) de 240 muestras medidas en 24 semanas desde finales de primavera hasta principios de otoño de 2021. - 93 -*

VIII. INDICE DE ABREVIATURAS

AEMET	Agencia Estatal de Meteorología
BB	Probeta de base de la rama, con diámetros de 20-30 mm y longitud de 5-10 cm, sin acículas.
BBMC	Contenido de humedad medido en la base de la rama
BBMC%	Contenido de humedad medido en la base de la rama en porcentaje (%)
BM	Probeta en la mitad de la rama, con diámetros de 10-20 mm y longitud de 5-10 cm, sin acículas.
BMMC	Contenido de humedad medido en la mitad de la rama
BMMC%	Contenido de humedad medido en la mitad de la rama en porcentaje (%)
CAMS	Servicio de Monitoreo Atmosférico Copernicus (<i>Copernicus Atmosphere Monitoring Service</i>)
DANA	Depresiones Aisladas a Niveles Altos
DAP	Diámetro a la altura del pecho, a 1,3 m de altura del fuste
ETM	Ecosistemas de Tipo Mediterráneo
FFDI	Índice de peligro de incendios forestales (<i>Forest Fire Danger Index</i>)
FWI	Índice meteorológico de incendios forestales canadiense (<i>Canadian Forest Fire Weather Index</i>)
GEI	Gases de Efecto Invernadero
GFS	Gestión Forestal Sostenible

GIS	Sistema de Información Geográfica
ha	Hectárea
Ht	Altura total del árbol expresada en metros (M)
ISC	Corriente de cortocircuito (<i>Short-Circuit Current</i>) expresada en amperios (A)
LF	Probeta en parte final de la rama, con diámetros <10 mm, con ramillas y acículas, sin piñas (<i>Life Fuel</i>).
LFMC	Contenido de humedad del combustible vivo fino (<i>Live Fuel Moisture Content</i>)
LFMC%	Contenido de humedad del combustible vivo fino en porcentaje (%)
MC%	Contenido de humedad en porcentaje (%) (<i>Moisture Content</i>)
MITECORD	Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico del Gobierno de España
PNACC	Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático
SIG	Sistema de Información Geográfica
Std	Desviación Estándar
UE	Unión Europea
V	Tensión eléctrica, expresada en voltaje (V)
WFAS	Sistema de Evaluación de Incendios Forestales (<i>Wildland Fire Assessment System</i>)

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Cambio climático y riesgos forestales

El cambio climático ya es un hecho aceptado por la comunidad internacional y científica (Naciones Unidas 1998). Las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera han incrementado debido a las actividades humanas, principalmente la quema de combustibles fósiles en energía y transporte, la gestión de residuos, pero también los cambios de uso del suelo que han provocado grandes alteraciones en el paisaje (Gracia *et al.* 2002). A raíz de esto, la temperatura media de la superficie de la tierra está siendo más alta que en cualquier otro momento del pasado milenio (figura 1) (Gracia *et al.* 2002). Además, los patrones de precipitación también están cambiando en todo el planeta (Watson 2001). Todo este proceso de cambio climático global está teniendo un efecto directo en la circulación atmosférica, lo que está aumentando la ocurrencia de eventos atmosféricos extremos (Olcina-Cantos 2021).

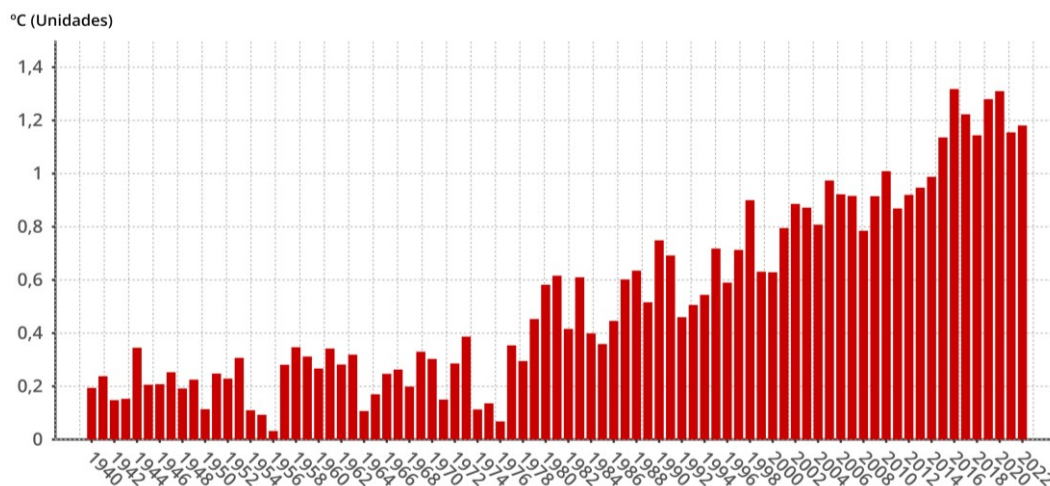


Figura 1. Aumento de la temperatura en superficie a escala mundial por encima de los niveles de 1850 a 1900 en °C (epdata 2023).

La región mediterránea con su especial sensibilidad ante los efectos del cambio climático ya está presentando alteraciones en los patrones climáticos, como por ejemplo fenómenos atmosféricos extremos como épocas más largas de sequía

extrema (Beniston *et al.* 2007; Jenkins 2011), depresiones aisladas a niveles altos (DANA o gota fría) (Catto *et al.* 2019; Quereda *et al.* 2000; Tamayo & Nuñez 2020), fuertes huracanes y nevadas (Beniston *et al.* 2007; Herrera 2018), fuertes temporales marinos y reducción de playas (Romero & Kerry 2017), alteraciones en la distribución de especies vegetales (Carrión *et al.* 2002; López de Heredia *et al.* 2007) y pérdida de biodiversidad de flora y fauna (Svenning & Skow 2006; Valladares *et al.* 2004), así como plagas que afectan tanto a los ecosistemas forestales (Hódar *et al.* 2012) como a algunas producciones agrarias (Olcina-Cantos 2021). Ante este problema global, con especial impacto en la región mediterránea (Lindner *et al.* 2010, Schröter *et al.* 2005), y debido a los escasos avances en materia de reducción de emisiones a nivel mundial, la adaptación de nuestro territorio y un nuevo enfoque de gestión forestal sostenible (GFS) se presentan como retos clave para lograr la sostenibilidad, que tiene que ser la meta prioritaria de las políticas, planes y programas de la gestión territorial en las próximas décadas (Sanz & Galán 2020).

1.1.1. Emergencia climática e impacto sobre ecosistemas forestales mediterráneos

Especialmente en latitudes polares y subpolares el efecto del calentamiento global está generando una alteración en la circulación atmosférica (Olcina-Cantos 2021; Tamayo & Nuñez 2020). Esta alteración se refleja en la pérdida de velocidad de la corriente jet polar del hemisferio norte (Francis & Vavrus 2012; Martín León 2019; Olcina-Cantos 2021). Este enlentecimiento tiene como consecuencia directa un importante incremento de episodios meteorológicos adversos (Catto *et al.* 2019; Olcina-Cantos 2021). El clima mediterráneo, debido a su carácter de frontera (Rick *et al.* 2020), es uno de los escenarios mundiales donde más repercusión está teniendo el actual proceso de calentamiento global (Cramer *et al.* 2018). El cambio climático está adquiriendo en la cuenca mediterránea, además, unos rasgos propios, debido al propio calentamiento del mar Mediterráneo (Pastor 2020), lo que está alterando aún más los procesos atmosféricos.

Según Rodríguez & Gutiérrez (2018), todas las proyecciones de los Escenarios del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC 2017) concluyen que en nuestro país se producirá un aumento progresivo del valor medio anual y estacional de la temperatura máxima global, a lo largo del siglo XXI (Sanz & Galán 2020).

Además, a largo plazo, teniendo en cuenta las proyecciones generadas para el periodo 2081-2100 en la España peninsular, las variaciones anuales de la temperatura máxima

estarían comprendidas en el peor de los escenarios entre 4,2°C y 6,4°C y entre 2,0°C y 3,4°C en el escenario más benévolo (Sanz & Galán 2020; Rodríguez & Gutiérrez 2018). Hay también que destacar que, durante el periodo estival, los cambios esperados serían superiores al resto del año, pudiendo alcanzar promedios superiores a los 5°C y mostrando un patrón de distribución espacial de estos aumentos más acusados en el interior, en el sur y en el este peninsular y menores en el norte, siendo más altas en el interior que en las costas (Amblar *et al.* 2017; Sanz & Galán 2020). Pero de forma más próxima en el tiempo, a corto y medio plazo, las predicciones no son mejores, ya que como predicen Fernández *et al.* (2017) los cambios de la temperatura media anual en el periodo 2021-2050 en la España continental y las Islas Baleares es de hasta casi 3°C, siendo mayores los incrementos en verano y otoño.

Con relación a la temperatura mínima los escenarios calculados para el siglo XXI por Amblar *et al.* (2017), al igual que indican las predicciones para la temperatura máxima, la temperatura mínima anual manifestará un patrón de aumento, destacando dentro de la España peninsular unos aumentos anuales de entre 3,7°C y 5,5°C. con una distribución de igual características que la mostrada por las temperaturas máximas.

En la actualidad el número de días en situación de ola de calor ha aumentado de forma significativa en las últimas décadas (figura 2) (AEMET 2020). Además, según el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECORDER) (Sanz & Galán 2020), pronostica de forma paralela al aumento de las temperaturas un aumento en la evolución del número de días cálidos a lo largo del siglo XXI, alcanzando un incremento de días cálidos de casi un 50% en la España peninsular para finales del siglo. Asimismo, todas las previsiones realizadas por estos organismos concuerdan en que las olas de calor serán más largas, calculando un aumento de la duración de la ola de calor de entre 15 a 50 días.

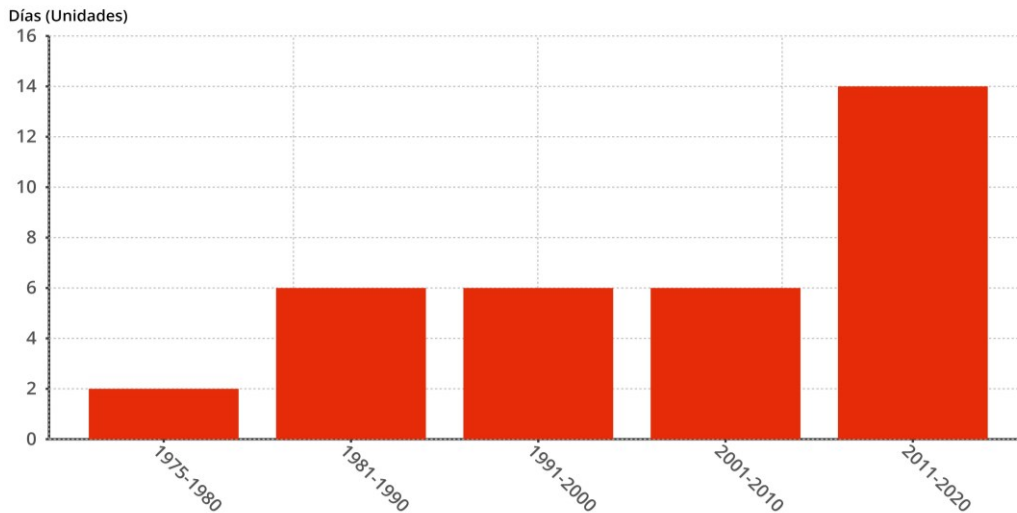


Figura 2. Número de días al año en situación de ola de calor en España por décadas desde 1975 (epdata 2023).

El cambio climático en las regiones mediterráneas no solo tiene una afeción sobre la temperatura atmosférica, ya que, con respecto a la velocidad del viento, los escenarios calculados por Amblar (2017) para la península ibérica durante el siglo XXI predicen un aumento de la velocidad media del viento en verano de más de 10 m/s. En estos cálculos se destacan una reducción de episodios con intensidades medias (>70 km/h), pero también destaca un aumento de episodios de vientos intensos (>90 km/h) de forma generalizada en casi toda la península ibérica. Dentro del área mediterránea, Herrera (2018) identifica una mayor incidencia de los eventos extraordinarios debidos a episodios de vientos extremos, generados, como pronostican Romero & Kerry (2017), por un mayor número huracanes ubicados sobre el mar Mediterráneo, también conocidos como “Medicanes”, con vientos de incluso más de 110 km/h.

Otra de las variables meteorológicas que, según los cálculos realizados por Amblar (2017), se verá afectada en la España peninsular serán las precipitaciones, que sufrirán una disminución de entre 4% y 16% a lo largo de la segunda mitad del siglo XXI, respecto al periodo de referencia (1961-1990). Sin embargo, Fernández *et al.* (2017) predicen para el periodo estival ibérico reducciones que pueden alcanzar el 30%. Pero, además, según publican varios autores (Beniston *et al.* 2007; Blenkinsop and Fowler 2007; Christensen *et al.* 2007), no solo se reducirán las precipitaciones recogidas sino también el número medio de días de precipitación anual, en promedio, hasta 14 días menos de lluvia al año, con un aumento de los periodos sin lluvia de entre 1 y 11 días en promedio y destacando que se pueden dar mayores aumentos en la mitad sur y en el este peninsular (Sanz & Galán 2020). Así mismo, también se remarca un ligero descenso progresivo de la presencia de nubes a lo largo del siglo XXI para toda España y en todas las estaciones.

Además, hay que tener en cuenta que los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos no solo son dependientes de los cambios en la cantidad de lluvia que se registra, sino que también vienen condicionados por la distribución temporal de la precipitación, el régimen de viento y la temperatura, así como por el uso y cobertura del suelo (Fernández *et al.* 2001; Gracia *et al.* 2002; Sanz & Galán 2020). El contenido de agua en el suelo de un ecosistema forestal mediterráneo presenta de forma natural una gran amplitud, mostrando valores muy próximos a cero durante la sequía estival, hasta valores máximos durante periodos de pluviosidad más abundante y continua (Gracia *et al.* 2002). No obstante, el incremento de temperatura y la mayor demanda evaporativa de la atmósfera que se prevé hacia el año 2040 generados por las predicciones de cambio climático conllevarán, según los expertos, a una disminución del 25% sobre el contenido actual de agua en los suelos forestales (Gracia *et al.* 2002), lo que sumado al resto de cambios en el clima están generando cambios en la biodiversidad en los ecosistemas forestales mediterráneos, concretamente en la fenología de muchas especies tanto de flora como de fauna (Alario Franco *et al.* 2011). Bellard (2012) ha podido incluso demostrar que, durante los últimos 50 años, el inicio de ciertos procesos fenológicos claves se ha venido adelantando una media de cinco días en cada década. Por otro lado, otro grupo de investigaciones en base al estudio del polen (Carrión *et al.* 2001; López de Heredia *et al.* 2007) han demostrado la existencia de cambios altitudinales y latitudinales en la distribución de algunas especies forestales en tiempos relativamente reducidos, lo que fuerza el desplazamiento hacia el norte de muchas especies vegetales y genera cambios drásticos en las especies mediterráneas endémicas, los cuales pueden acarrear extinciones locales (García & Cutillas 2017). Además, varias publicaciones a nivel global alertan que la pérdida de biodiversidad puede ser particularmente severa en la Europa mediterránea con un aumento de los riesgos de extinción de varias especies a medio plazo (Svenning & Skov 2006; Thomas *et al.* 2004; Thuiller *et al.* 2005).

Ante esta situación, en la Comunidad Valenciana, la Generalitat Valenciana ha asumido desde 2019 la responsabilidad de dotar de un mayor impulso a la lucha contra el cambio climático mediante la declaración formal de la emergencia climática por parte del Consell y les Corts (GVA 2019) a través de la mitigación, la adaptación, la investigación, sensibilización y cooperación. Esto ha redundado a nivel normativo en la reciente Ley de Cambio Climático (GVA 2022), que tiene como principal objetivo abordar la crisis ecológica y el cambio necesario desde las propias competencias en las políticas públicas, en la que la GFS y la prevención de los incendios forestales juega un papel fundamental.

En la Comunidad Valenciana y en el resto de los territorios de la cuenca mediterránea española, debido al aumento de los periodos de sequía más prolongados e intensos que se vienen registrando, se están generando cambios en la mortalidad y en la regeneración de especies vegetales, en detrimento de la productividad de los bosques

(García & Cutillas 2017; Peñuelas *et al.* 2004). Esto implica cambios en el rango de distribución actual de las especies, pero también principalmente en el decaimiento de las masas forestales (Carnicer *et al.* 2011; García & Cutillas (2017); Ruiz-Benito *et al.* 2013).

Trabajos como el realizado por Fuster (1996) muestran un decaimiento de entre el 20-30% de las masas forestales consolidadas. Esteve *et al.* (2015) concluyen que el límite inferior del bosque puede verse desplazado hacia el norte, dejando en condiciones de gran precariedad las zonas del litoral y prelitoral del área mediterránea más seca. Según estos expertos, las especies más afectadas por el cambio climático serían *Pinus nigra*, *Pinus pinaster* y *Juniperus thurifera*, aunque en términos absolutos podría afectar también al *Pinus halepensis*. Esta especie en clara y rápida expansión, sobre todo en las regiones mediterráneas occidentales (Bede-Fazekas *et al.* 2014; Esteve *et al.* 2015), aunque está muy bien adaptada a fuertes sequías estivales (Matamoros *et al.* 2008; Puértolas *et al.* 2005), podría verse también afectado en condiciones de sequía extrema en las zonas mediterráneas más secas (Selma *et al.* 2017). Este pronóstico quedó documentado durante el periodo 2014-2016, en el que la Región de Murcia sufrió una de las sequías más extremas de las últimas décadas. De hecho, el año hidrológico 2013-2014 fue el año más seco desde 1941, con un registro de 146 l/m², un 46% del valor medio de la precipitación anual del periodo 1970-2000 (García & Cutillas 2017), de forma que las especies dominantes de las principales masas forestales, especialmente *Pinus halepensis*, y las especies de matorral *Rosmarinus officinalis*, padecieron un grave proceso de decaimiento con una pérdida drástica de la superficie foliar y altas tasas locales de mortalidad (Esteve *et al.* 2015).

Por lo tanto, para García & Cutillas (2017), no hay duda de que el cambio climático y la intensificación de los estados de aridez que conlleva afectarán a los ecosistemas forestales mediterráneos, por lo que se considera necesario analizar y anticiparse a sus efectos, con el fin de mejorar la adaptación y la resiliencia de estos ecosistemas, mediante la conjunción inteligente de la modelización, con el seguimiento y observación de los diferentes estratos forestales sometidos a episodios extremos de sequía.

1.1.2. Incendios forestales: impactos sociales, económicos y medioambientales

Los incendios forestales son un factor de perturbación dominante en casi todas las zonas de vegetación forestal en todo el mundo y representan importantes emisiones de compuestos gaseosos y particulados a la atmósfera con graves impactos físicos, biológicos y ambientales (Sutherland *et al.* 2005).

La región mediterránea es uno de los puntos calientes del cambio climático (Giorgi 2006). En esta área, los incendios forestales tienen un impacto significativo, quemando aproximadamente 0,5 millones de hectáreas cada año en los cinco estados miembros del sur de la Unión Europea (UE): Portugal, España, Grecia, Italia y Francia (San-Miguel-Ayán *et al.* 2013).

La región mediterránea se caracteriza por veranos cálidos y secos, una gran diversidad de especies de plantas y una variabilidad geográfica y topográfica inusual, relacionada con la presencia de una costa irregular y muchas cadenas montañosas, a menudo bastante empinadas. Desde 1960, la ocurrencia de incendios forestales ha aumentado debido a los cambios en el uso de la tierra, lo que resultó en un abandono generalizado de la agricultura y la gestión forestal, aumentos en la carga de combustible y continuidad en el paisaje (Moreira *et al.* 2011). Se considera que estos factores son los principales impulsores del aumento de la ocurrencia de incendios forestales y el consiguiente riesgo de degradación del suelo (Caon *et al.* 2014; Giovannini *et al.* 2001; Pausas 2004; Campo *et al.* 2006; Pausas *et al.* 2008; Raison *et al.* 2009; Shakesby 2011; Castro *et al.* 2012; Resco de Dios (2007).

Además, el clima actual tiene una gran influencia en los incendios forestales, especialmente en condiciones extremas (Crockett & Westerling 2018; Holden *et al.* 2018). Un aumento en la duración y severidad de las olas de calor (Hoinka *et al.* 2009; Piñol *et al.* 1998) ha causado un aumento dramático en la incidencia de incendios durante las últimas décadas, y se espera que los incendios sean más frecuentes en el futuro debido a la emergencia climática (Vilén & Fernandes 2011). Así, debido a todos los cambios inducidos por el calentamiento global, para el siglo XXI se prevé un aumento de la recurrencia de incendios forestales en términos de intensidad y frecuencia (Hoerling *et al.* 2012).

Cuando las condiciones climáticas son particularmente severas (p. ej., olas de calor o veranos muy calientes y secos combinados con fuertes vientos), los incendios forestales pueden alcanzar proporciones catastróficas, los llamados eventos de megaincendios, produciendo no solo pérdida de biodiversidad, erosión del suelo y desertificación (Boer 2020; Castellnou 2018; Pausas *et al.* 2008; Quílez 2020; Nolan 2020; Resco de Dios 2007), sino también grandes pérdidas económicas y amenazas para la vida humana, pero además también notables emisiones de GEI a la atmósfera (Chiriaco *et al.* 2013; Lerma-Arce *et al.* 2022). Los gases de efecto invernadero y el material particulado influyen directamente en el clima (Menon *et al.* 2002; Ramanathan & Carmichael 2008) debido a la liberación de diversos tipos de gases y aerosoles a la atmósfera por la combustión de biomasa durante los incendios, que tienen un impacto significativo en la química atmosférica, los ciclos biogeoquímicos y, en consecuencia, en el clima (Alves *et al.* 2010). Muchos de estos gases no solo contribuyen al cambio climático y al proceso del efecto invernadero, sino que también

pueden desencadenar muchas otras repercusiones. Esta perturbación implica también un cambio en la dinámica de la producción primaria bruta y la respiración de los ecosistemas forestales (Boer 2009; Lerma-Arce *et al.* 2022). Asimismo, también conlleva un cambio en la dinámica de la producción primaria bruta y la respiración de los ecosistemas. Igualmente, conduce a pérdidas netas de producción del ecosistema que continúan durante varios años después del evento, lo que es seguido por un período sostenido de varias décadas de absorción neta de carbono del ecosistema (Amiro *et al.* 2010).

Se están realizando esfuerzos políticos, regulatorios y de investigación a nivel internacional con el fin de reducir las emisiones de carbono, con compromisos vinculantes y no vinculantes y altos objetivos de reducción de emisiones a escala mundial (UNFCCC 2022; UNFCCC 2018; United Nation 2015) y a nivel europeo (European Commission 2019; European Parliament 2018; European Parliament 2013). Sin embargo, como destaca Garay Moena (2019) en base al el Proyecto FIRESMART europeo, no existe una política común en Europa sobre la gestión de incendios forestales y su prevención, incluso apenas es mencionado el problema en la nueva Estrategia Forestal de la UE 2030 (European Commission 2021). Esta Estrategia se limita a considerar necesaria la reducción de los riesgos para los ecosistemas forestales europeos en general en el contexto de incertidumbre por el cambio climático mediante medidas de adaptación adecuadas y prácticas de GFS que fortalezcan su resiliencia. En definitiva, los incendios forestales apenas aparecen en la Estrategia, obviando el principal problema forestal de la Europa Mediterránea, así como recalcan tanto el informe del Parlamento Europeo (European Parliament 2022) como el dictamen del Comité de las Regiones (European Commission 2022). Para ello, no solo se debe desarrollar el conocimiento técnico, sino que también se deben ofrecer incentivos y apoyo regulatorio.

Centrándonos en la región Mediterránea, Moreno *et al.* (2014) han observado que las variables climáticas ya supusieron uno de los motores del incremento de los incendios forestales para el periodo 1968-2010. Además, Rodríguez (2016), ha podido observar en un estudio retrospectivo que entre 1974 y 2013 los incendios de 1 a 500 ha han disminuido en España desde el inicio de la década de los 90 respecto a los 80 y 70, pero el número de conatos de incendio (incendios menores de 1 ha) se incrementaron a partir de los 90, siendo del orden del 70% de los incendios entre 1993 y 2013.

El clima mediterráneo se define en la bibliografía como un clima de transición, siendo su característica climática más importante la coincidencia de la época seca con la cálida (Bodí *et al.* 2012). Esta peculiaridad climática hace que los ecosistemas presenten una vegetación agostada en verano, de naturaleza inflamable con características que favorecen la aparición y expansión de los incendios forestales (Naveh 1991). Esta evolución climática ha sido acompañada en amplias zonas del

interior de la zona mediterránea española de una intensa emigración rural a partir de la década de 1960 hasta nuestros días (Hernando *et al.* 2008), que ha llevado no solo al abandono de la GFS en muchas masas forestales, sino también al abandono de muchos campos de cultivo provocando un incremento de la cubierta forestal (figura 3) (Pausas *et al.* 2008; Delgado-Artés *et al.* 2022).

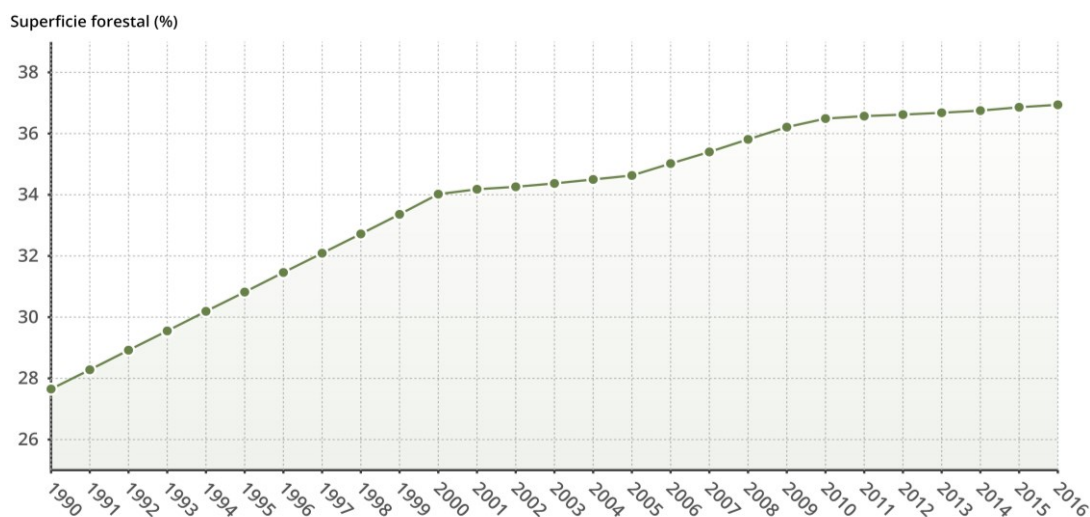


Figura 3. Incremento de la cubierta forestal en España (epdata 2023).

A este cambio de usos del suelo, también hay que añadir las repoblaciones monoespecíficas de pinar durante las décadas de los 50, 60 y 70 y el aumento de nuevas zonas residenciales en la interfaz urbano-forestal (Vallejo *et al.* 2009). Todo ello ha tenido como consecuencia un incremento considerable del riesgo de incendios forestales en las propensas zonas del mediterráneo (De Rigo *et al.* 2017; Sanz & Galán 2020), principalmente cuando se dan ventanas meteorológicas extremas especialmente en veranos muy secos (Resco de Dios 2007; Sanz & Galán 2020).

Hay muchos estudios sobre evaluaciones de riesgos ecológicos (De Rigo *et al.* 2017) relacionados con los peligros de incendios, evaluando los riesgos para los servicios ecosistémicos de los incendios forestales (Lecina-Díaz *et al.* 2021) o el riesgo de humo de incendios en las poblaciones (Dokas *et al.* 2007). También existe una bibliografía muy extensa sobre la evaluación del riesgo de incendios (Chuvienco *et al.* 2003; Chuvienco *et al.* 2012; Sivrikaya & Küçük 2022; Tomar *et al.* 2021; You *et al.* 2017) y el peligro de incendios en la cuenca del Mediterráneo utilizando índices de peligro de incendios a gran escala, como el *Canadian Forest Fire Weather Index* (FWI) (Stocks *et al.* 1989; Van Wagner & Forest 1987), el *Wildland Fire Assessment System* (WFAS) (Burgan & Bradshaw 1997), el Índice de peligro de incendios forestales (Keetch &

Byram 1968), etc. Estos índices se basan en información meteorológica o modelos estadísticos de clima y vegetación (Carvalho *et al.* 2011; Chuvieco *et al.* 2010; Karali *et al.* 2014; Lung *et al.* 2013; Moriondo *et al.* 2006; Pellizzaro *et al.* 2010; Turco *et al.* 2014). Los patrones a pequeña escala en el comportamiento del fuego son importantes desde el punto de vista del riesgo y se pueden evaluar utilizando una serie de enfoques innovadores desarrollados en las últimas décadas para estimar y mapear el riesgo y la exposición a incendios forestales (Botequim *et al.* 2013; Chuvieco *et al.* 2003; Chuvieco *et al.* 2010; Martínez *et al.* 2009; Finney 2005; Verde & Zêzere 2010). Estos enfoques utilizan la evaluación cuantitativa del riesgo de incendios forestales (Finney 2005) y emplean nuevos y más potentes sistemas de modelado de incendios. Así, en el informe INFOADAT (Moreno 2016), se puede encontrar que mediante la aplicación de índice de riesgo de incendio (FWI) el valor climatológico medio del FWI para las épocas de incendios en el periodo 1981-2000 es de más de 50 en casi toda la España con clima mediterráneo.

Sumando a estos factores intrínsecos del área mediterránea, las predicciones realizadas por Moreno (2016), destacan que el cambio climático involucrara cambios en las características del combustible tanto muerto como vivo haciendo que sus niveles de humedad sean inferiores a los que poseen actualmente, aumentando también el peligro de los incendios forestales. De Rigo *et al.* (2017) predice, incluso a corto plazo, un mayor riesgo de incendio en prácticamente toda la Península Ibérica. Y, aunque pueda existir alguna cierta incertidumbre sobre la magnitud del efecto del cambio climático, De Rigo *et al.* (2017) muestra de forma clara que el peligro de incendios forestales provocados por el clima está aumentado con el cambio climático en todo el Mediterráneo.

A nivel global, el fuego juega un papel muy importante como regulador natural de algunos ecosistemas, siendo parte fundamental de la historia evolutiva de la tierra (Bodí *et al.* 2013; McLauchlan *et al.* 2020; Naveh 1975; Pausas & Keeley 2009). La configuración de ecosistemas como los bosques boreales de coníferas, praderas, sabanas y bosques mediterráneos, es debida principalmente a la acción del fuego además de por motivos climáticos (Bodí *et al.* 2008; Bond *et al.* 2005). La recurrencia de incendios propicia un ecosistema distinto del esperado según la situación climática en la que se encuentra (Bodí *et al.* 2013; McLauchlan *et al.* 2020; Naveh 1975; Pausas & Keeley 2009). En estas circunstancias de incendios reiterados, las especies con algún mecanismo de resistencia al fuego perduran y desarrollan para su propia supervivencia dispositivos de reproducción y morfologías para resistir e incluso favorecer los incendios con un régimen concreto de recurrencia (Bodí *et al.* 2012). El fuego es así un factor ecológico esencial en la distribución de los biomas de la Tierra, funcionando como un gran herbívoro (Bond & Keeley 2005). Sin embargo, actualmente los incendios causados directa o indirectamente por la actividad antropogénica están presentes en todos los ecosistemas vegetales existentes en el mundo (Castillo *et al.*

2003). Y se estima que anualmente se pierden de 10 a 15 millones de hectáreas de bosques en regiones boreales y templadas, mientras que de 20 a 40 millones se pierden en bosques tropicales (Castillo *et al.* 2003).

a) Impactos medioambientales

La generación de un fuego descontrolado en un área forestal tiene diferentes impactos medioambientales, entre los que destacan la modificación de los ciclos biogeoquímicos, los cambios en la vegetación, en el suelo, en la fauna, en los procesos hidrológicos y geomorfológicos, en la calidad de las aguas e incluso cambios en la composición de la atmósfera (Bodí *et al.* 2012; Boer 2009; Nolan 2020). Así, los impactos que puede generar un incendio forestal son muy variados y depende de la biomasa disponible, intensidad, área quemada, tiempo desde el último incendio, tipo de suelo, humedad, pendiente y vegetación (Neary *et al.* 1999). Por lo tanto, cada ecosistema forestal, e incluso cada área dentro de un mismo ecosistema, puede tener un grado de impacto y efectos del fuego diferentes (Bond & Keeley 2005).

Sin embargo, en condiciones mediterráneas, tras el vacío biológico que deja un incendio forestal (Resco de Dios 2022; Rodrigues *et al.* 2023), es usual poder observar una importante actividad biológica posterior al paso del fuego (del Campo 2019; de las Heras *et al.* 2012; Mataix-Solera *et al.* 2007). Esto es debido a la existencia de especies vegetales que presentan adaptaciones encaminadas a resistir el fuego, ya que han evolucionado desarrollados mecanismos reproductivos (capacidad de rebrote o germinación por diseminación de semilla) y ciclos vitales que dan ventaja competitiva a la especie cuando el fuego está presente (Arianoutsou *et al.* 1993). Después de la generación de un fuego no se produce una sucesión en el sentido de que unas comunidades reemplazan a otras, sino que comienza una reaparición de las especies que pertenecían ya a la comunidad de forma progresiva (Trabaud 1990). Lloret y Zedler (2009) demostraron que en los ecosistemas mediterráneos las comunidades vegetales han desarrollado una gran habilidad para volver a las condiciones anteriores a la alteración. No obstante, (Lucas-Borja *et al.* 2022; Pausas & Keeley 2009; Bodí *et al.* 2012) destacaron que esta adaptación de las especies mediterráneas es un régimen de fuegos, y el cambio de régimen de incendios puede tener impactos importantes en la comunidad vegetal de los ecosistemas.

Después de un fuego forestal no solo la vegetación se ve afectada, el suelo es otro de los eslabones fundamentales de un ecosistema forestal que tras el fuego puede sufrir cambios (Andreu *et al.* 2001; Gimeno-García *et al.* 2000; Rubio *et al.* 1997). Son cambios directos producidos por el calentamiento y la combustión, e indirectos por la pérdida de la cubierta vegetal y recubrimiento de las cenizas (Neary *et al.* 1999). Con ello, el calentamiento producido por el paso del fuego genera variaciones en algunas

de las propiedades más importantes del suelo (González-Pelayo *et al.* 2006). El pH y la conductividad eléctrica normalmente aumentan, debido al aporte de carbonatos, cationes básicos y óxidos procedentes de las cenizas. El tiempo de recuperación de las características iniciales del suelo varía en función del tiempo que las cenizas permanezcan en el suelo (Mataix-Solera *et al.* 2007).

Por otro lado, aunque el aporte de cenizas también enriquece el suelo con un aumento de nutrientes, hay algunos nutrientes que se pierden con el humo del fuego: o bien se volatilizan (Raison *et al.* 1985), o también se pierden por la acción del viento, la erosión o la lixiviación, sobre todo cuando no hay vegetación que los proteja (Arianoutsou *et al.* 1993; Neary *et al.* 1999). Finalmente, también hay que tener en cuenta los efectos indirectos del fuego sobre los suelos, que se producen a partir de la desaparición de la cubierta vegetal, la adición de cenizas y el ennegrecimiento del suelo (Gimeno-García *et al.* 2007; González-Pelayo *et al.* 2010; Neary *et al.* 1999).

En cuanto al impacto de los incendios sobre el ciclo del agua, hay que tener en cuenta que, como consecuencia inmediata, la hidrología del suelo se ve afectada debido al aumento de la hidrofobicidad, la reducción de la materia orgánica, la disminución de la porosidad y la estabilidad de los agregados, el sellado del suelo por partículas minerales o cenizas y, de forma muy especial, por la reducción de la cubierta vegetal (Gimeno-García *et al.* 2007; González-Pelayo *et al.* 2010, Larsen *et al.* 2007). Desde el punto de vista de la erosión, la pérdida de la cubierta vegetal implica que la lluvia encuentre menos obstáculos en su trayectoria hacia el suelo, aumentando su energía cinética y su capacidad para destruir los agregados edáficos hidrófoba (Bodí *et al.* 2012; del Campo 2018; Doerr *et al.* 2009). La desarticulación de la estructura del suelo conlleva una disminución de la porosidad por la formación de costras, lo que influye directamente en la eficacia de la infiltración de agua en el suelo y un aumento de escorrentía y la erosión, siendo además la responsable de disminuir la humedad del suelo en la zona hidrófoba (Bodí *et al.* 2012; Doerr *et al.* 2009).

Además de los impactos medioambientales a nivel local descritos anteriormente, uno de los mayores impactos de los incendios forestales sobre el medio ambiente global son los que provoca sobre el cambio climático (Lerma-Arce *et al.* 2022). Durante la quema de un bosque la combustión de enormes cantidades de biomasa provoca la emisión de gases químicamente activos, tales como monóxido de carbono, metano u óxido nítrico. Así como la liberación a la atmósfera en cuestión de horas del dióxido de carbono almacenado por los árboles durante décadas (Castillo *et al.* 2003).

Según los datos del *Copernicus Atmosphere Monitoring Service* (CAMS), los incendios forestales globales en 2021 causaron un total estimado de 1.760 Mt de emisiones de carbono, lo que equivale a 6.450 Mt de CO_{2eq} (CAMS 2021). Para poner esta cifra en perspectiva: las emisiones totales de CO₂ de los combustibles fósiles en la UE en 2020 ascendieron a 2.600 Mt (CAMS 2021). En otras palabras, los incendios forestales a nivel

mundial en 2021 generaron un 148 % más que las emisiones totales de combustibles fósiles de la UE en 2020 (CAMS 2021). Además, se observa una tendencia al alza en los últimos años, siendo las emisiones totales de incendios forestales en la UE en el primer semestre de 2022 de unas 6,4 Mt CO_{2eq} de carbono, el nivel más alto desde 2007 (CAMS 2021).

b) Impactos sociales

Los incendios forestales, sobre todo los grandes incendios forestales, tienen graves repercusiones sobre la sociedad rural (Rojas-Briales *et al.* 2018). La pérdida de vegetación forestal, pero también de cultivos agrícolas conlleva importantes pérdidas en cuanto a puestos de trabajo en la actividad forestal y agronómica (Barrio *et al.* 2007; Mataix-Solera y Cerdà 2009; Micheletti *et al.* 2018; Valenzuela y Cáceres 2011). Así, por ejemplo, tras los incendios de 2017 en la región centro-sur de Chile se perdieron el 39% de los puestos de trabajo en el área afectada (Micheletti *et al.* 2018). La pérdida de empleo tras un incendio se añade a las pocas oportunidades de trabajo que se presentan generalmente en las zonas rurales donde se encuentran las masas forestales, lo que lleva a más éxodo de las zonas rurales a las zonas urbanas, aumentando así aún más el problema de despoblamiento que sufren amplias zonas del interior de la zona mediterránea en España (figura 4) (Delgado-Artés *et al.* 2022; Hernández 2022; Lasanta-Martínez *et al.* 2005; Sempere Souvannavong 2016).

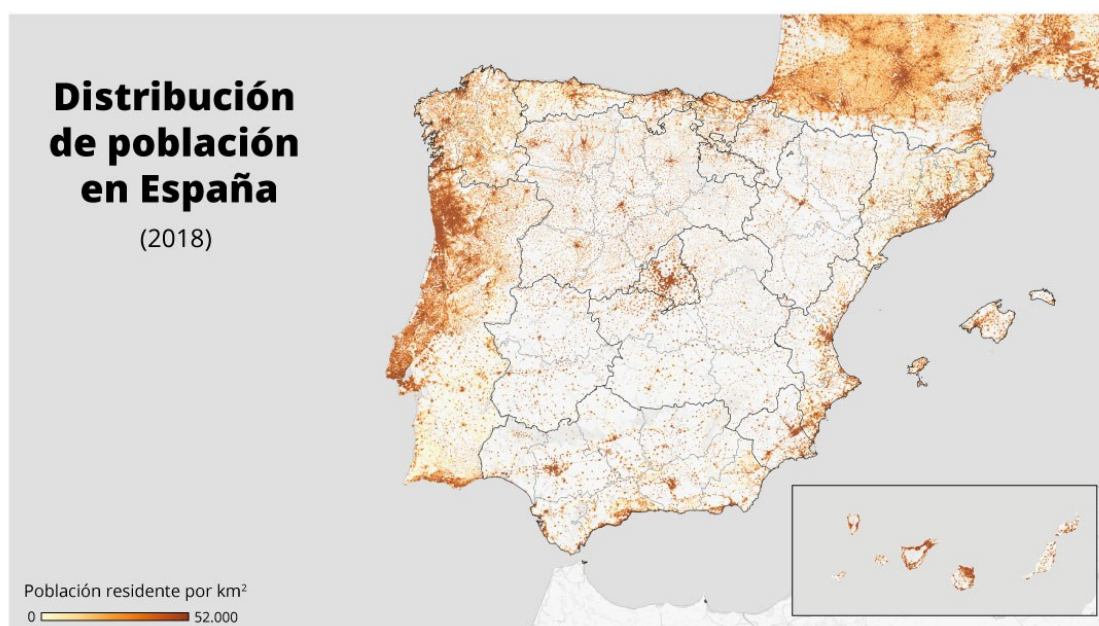


Figura 4. Distribución de población en España (2018) (epdata 2023).

Además de los impactos medioambientales y sobre la actividad rural que se producen como consecuencia de un incendio forestal, diferentes estudios han podido documentar también diferentes problemas de salud sufridos por las personas que participan en las tareas de extinción y los residentes en zonas cercanas, los cuales se enfrentan a problemas de salud derivados del estrés, la fatiga por calor y el riesgo de lesiones por accidentes (Barberá Riera 2017). Pero además se han podido registrar problemas de salud por la exposición no ocupacional al humo de los incendios forestales, los cuales también presentan un alto riesgo para la salud de las personas, en relación con la exposición al humo, polvo, cenizas y residuos generados por el fuego (Barberá Riera 2017). Así, algunos estudios han encontrado una clara asociación entre la exposición al humo de incendios forestales y algunos problemas sanitarios de la población general, como los ingresos hospitalarios por causa circulatoria (Haikerwal *et al.* 2015) o respiratoria como exacerbaciones de asma y enfermedad pulmonar obstructiva crónica, bronquitis y neumonía (Liu *et al.* 2015). Incluso se ha podido observar esta asociación en poblaciones situadas a grandes distancias de los fuegos (Hänninen *et al.* 2009).

En este contexto, también destacan otro grupo de estudios que se han centrado en la investigación sobre la mortalidad derivados de la exposición no ocupacional a los incendios forestales (Liu *et al.* 2015), demostrando que existe una fuerte asociación entre la exposición al humo de los incendios forestales y la mortalidad por todas las causas (Resco de Dios 2022). A escala global, se estima que la mortalidad anual prematura atribuible al humo de los incendios forestales se sitúa en 339.000 defunciones en el año 2012 (Johnston *et al.* 2012). En estudios realizados sobre localizaciones específicas, el aumento de la mortalidad relacionado con la exposición al humo de incendios, en comparación con periodos sin incendios, se sitúa desde el 1,2 % para niños durante el evento (Jayachandran 2009). En un gran incendio ocurrido en la zona de Atenas (Grecia) en 2010 aumentó la mortalidad por causas respiratorias hasta un 92% durante los días del evento (Analitis *et al.* 2012). Dado que los incendios ocurren, sobre todo, durante el verano (Barberá Riera 2017), algunos trabajos de investigación también han analizado la interacción entre el calor y el humo derivado de los incendios, pudiendo concluir que la temperatura y los incendios forestales contribuyeron de manera conjunta a más de 2.000 defunciones en un incendio cercano a Moscú (Rusia) (Shaposhnikov *et al.* 2014). También se han realizado estudios con series de datos que han proporcionado evidencia creciente del aumento significativo en la mortalidad. Así, un trabajo realizado sobre 48 días clasificados como afectados por el fuego en Sídney (Australia) considerando datos de más de 13 años, demostró un incremento significativo en la mortalidad asociada a estos días (Johnston *et al.* 2012). Otro estudio realizado también en Sídney encontró un aumento sugestivo de la mortalidad asociado los incendios forestales (Barberá Riera 2017). Y un

metaanálisis de datos de 2003-2010 en diez ciudades del sur de Europa pudo demostrar un incremento significativo de la mortalidad cardiovascular durante los días afectados por el humo en comparación a los días clasificados como no afectados (Faustini *et al.* 2015). Por lo que debemos considerar que los incendios forestales no solo son una catástrofe para el ecosistema, su fauna y su flora del área afectada por el fuego, sino que también se ha podido demostrar de forma científica la afección sobre la salud de las personas en áreas incluso alejadas de fuego.

c) Impactos económicos

Pero además los incendios forestales llevan asociados importantes impactos económicos, generalmente en zonas rurales ya de por sí deprimidas y con menor índice de desarrollo económico que las zonas urbanas. Cuando se declara un incendio en una zona forestal, el primer impacto económico a considerar es el gasto generado en las propias labores de extinción. Este impacto, según la Agenda Forestal de Navarra (Gobierno de Navarra 2019), estaría alrededor de los 10.000 €/ha cuando intervienen medios aéreos. Aunque se pueden dar casos como, por ejemplo, el incendio forestal de Arico en Canarias en 2021 que calcinó poco más de 3.000 hectáreas, y cuyos gastos de extinción ascendieron a casi 68.000 €/ha (Gobierno de Canarias 2021).

Sobre estos gastos de extinción se deben contabilizar también las pérdidas de unos importantes recursos naturales directos e indirectos, como son los productos derivados de la madera (madera de sierra para construcción, carpintería, mobiliario, envase y embalaje, leñas y otros biocombustibles para aprovechamiento energético, corcho, resinas), pero también otros productos y recursos forestales no madereros como frutos, hongos, miel, pastos, caza y pesca (Martínez y Martínez Chamorro 1996). A ello hay que añadir que gran parte de los bosques mediterráneos tienen más valor económico por las externalidades que generan a la sociedad (servicios ambientales como fijación de carbono, calidad del agua, paisaje y biodiversidad) que por sus productos primarios tradicionales (Ortuño Pérez & Fernández-Cavada 2007). Así, como explica Jiménez (2006), las pérdidas estimadas en activos por cesación de los servicios que las áreas forestales prestan son de unos 2.200 €/hectárea calcinada, repartidos aproximadamente entre 30% de productos primarios y 70% de beneficios por servicios ambientales (Ortuño Pérez & Fernández-Cavada 2007).

En España se destinan más de 1.000 M€ al año a poner en marcha todas las diferentes medidas de extinción de incendios forestales (Ferreiro Gómez 2016; WWF España 2021). Pero en vista de las repercusiones que los incendios tienen en nuestra sociedad, y como también apuntan WWF en sus informes de 2021 (Hernández *et al.* 2021) y 2022 (Hernández *et al.* 2022), la extinción es necesaria y positiva, sin embargo, no es suficiente (Hernández *et al.* 2021; Hernández *et al.* 2022). Sin una política de

reordenación y planificación del territorio, acompañada de una GFS adecuada a cada estrato forestal el dinero invertido en extinción nunca será suficiente, más en un contexto de emergencia climática y pronóstico de más y mayores incendios en el futuro (Sanz & Galán 2020).

1.2. Estado del arte

El desarrollo de la presente tesis doctoral se sustenta en una serie de técnicas procedentes de diversos campos del conocimiento y que se repasan en los siguientes puntos.

1.2.1. Fisiología del árbol en situaciones de estrés hídrico

Los ecosistemas de zonas con clima tipo mediterráneo tienen como principal característica una disponibilidad hídrica limitada, además de una importante diferencia térmica estacional (Cabrera 2002). Esta combinación especial de características genera condiciones de gran estrés para las plantas que habitan estos ecosistemas, las cuales se encuentran restringidas en oportunidades de desarrollo y supervivencia (Santibáñez & Uribe 1990). Concretamente, para las especies arbóreas situadas en las altitudes bajas, un factor determinante en su distribución es el estrés hídrico (Cabrera 2002), de forma que podemos encontrar la vegetación distribuida siguiendo un gradiente de aridez (Mooney & Kummerow 1971; Cabrera 2002). Esta distribución se explica principalmente como una respuesta adaptativa de las plantas a la disponibilidad de agua (Armesto & Martínez 1978; del Campo *et al.* 2017; del Campo *et al.* 2020; Martínez & Armesto 1983).

Este estrés hídrico que sufren las plantas mediterráneas principalmente durante los veranos no es homogéneo entre todos los árboles lo largo del año, ya que este nivel de estrés es dependiente de las diferentes estrategias adaptativas seguidas por la especie (Cabrera 2002; Giliberto & Estay 1978; Nolan *et al.* 2018). De esta forma podemos encontrar que las especies perennifolias con raíces profundas tienen acceso a la humedad disponible en los horizontes profundos mostrando potenciales hídricos del xilema altos y menos variables (Cabrera 2002; Nolan *et al.* 2018). En contraposición se encuentran las especies de sistemas radicales más superficiales que tienden a utilizar el agua de lluvia cuando los horizontes más profundos no están totalmente recargados después del verano (Canadell & Zedler 1995), mostrando niveles de estrés más acusados y variables (Giliberto & Estay 1978).

La estacionalidad de las lluvias y las características térmicas del clima mediterráneo también han generado adaptaciones fotosintéticas en las especies (Puértolas *et al.* 2005). Así, los patrones fenológicos de las especies mediterráneas son claras adaptaciones que permiten el crecimiento vegetativo en primavera y verano (Arroyo *et*

al. 1981; Cabrera 2002; Puértolas *et al.* 2005) y en los momentos en los que la humedad del suelo es adecuada y las temperaturas permanecen favorables para la fotosíntesis (Puértolas *et al.* 2005).

Entre las especies de coníferas (principalmente pinos) más extendidas de la cuenca Mediterránea (EUFORGEN 2009; IFN3 2007; Puértolas *et al.* 2005), se han podido analizar diferentes estrategias de adaptación al estrés hídrico, llegando a eficiencias en el uso del agua similares durante el período estival y manteniendo tasas medias similares de fotosíntesis y transpiración (Puértolas *et al.* 2005). El *Pinus halepensis* presenta la capacidad de mantener una de las tasas más elevadas de fotosíntesis entre los pinos mediterráneos durante los periodos favorables de crecimiento (Awada *et al.* 2003). Sin embargo, una vez alcanzada la temporada donde los árboles empiezan a sufrir la reducción de agua disponible en el suelo, las tasas de fotosíntesis caen en el *Pinus halepensis* de forma brusca, acompañado de un descenso en la conductancia estomática (Schiller & Cohen 1998). También se produce un descenso de la transpiración con potenciales al amanecer inferiores a -1MPa , (Borghetti *et al.* 1998; Puértolas *et al.* 2005; Moran *et al.* 2017).

De forma contraria, durante el periodo de limitación hídrica, otro pino mediterráneo como el *Pinus pinea* muestra una reducción más moderada, manteniendo un consumo de agua estable de forma independiente de las condiciones de evapotranspiración (Puértolas *et al.* 2005) y mostrando una estrategia de conservación de los recursos hídricos, no gastando demasiada agua durante la primavera a expensas de reducir sus tasas de fotosíntesis en esa época. Este comportamiento también se ha podido observar en otras especies de pinos del ámbito mediterráneo como *Pinus nigra* (Lebourgeois & Becker 1996) y *Pinus pinaster* (Loustau *et al.* 1990). Estas diferentes estrategias de adaptación al clima mediterráneo mostrarían, por ejemplo, una diferenciación entre las características del sistema radical del *Pinus pinea* con una raíz principal pivotante, potente y profunda que permite una exploración del agua existente en el suelo a mayor profundidad (Prada *et al.* 1997) frente al *Pinus halepensis*, de raíces más superficiales (Puértolas *et al.* 2005).

1.2.2. Tecnologías avanzadas para la evaluación y monitorización del comportamiento fisiológico de los árboles ante el riesgo de incendios forestales

La gran mayoría de los sistemas de pronóstico de riesgo que utilizan las entidades con responsabilidad en la gestión y extinción de los incendios forestales (Corona *et al.*

2015; Schultz *et al.* 2019) están fundamentados, de forma predominante, en datos meteorológicos (Dimitrakopoulos *et al.* 2011), como el FWI, el cual es de uso generalizado a nivel mundial (Wang *et al.* 2017). Sin embargo, el comportamiento del fuego también está influenciado por la topografía y el combustible forestal (Quílez & Merida 2015); de forma destacable el contenido de humedad (MC) del combustible forestal, ya que es un determinante importante de la ignición y la tasa de propagación de los incendios forestales en ecosistemas donde las cargas de combustible no limitan la actividad del fuego (Boer 2017; Bradstock 2010; de Dios 2021; Sullivan 2009).

Los combustibles forestales se dividen en material vegetal vivo y muerto (Nolan *et al.* 2018). Los combustibles muertos, responden a las condiciones atmosféricas y pueden modelarse a partir de datos como la temperatura, la humedad o el déficit de presión de vapor (de Dios *et al.* 2015; Matthews 2013; Nolan *et al.* 2018). Pero, por el contrario, el contenido de humedad del combustible vivo (*Live Fuel Moisture Content* o LFMC) es mucho más difícil de modelar, ya que el contenido de humedad es una función de los rasgos fisiológicos y estructurales de la planta (Nolan *et al.* 2018), que pueden diferir notablemente entre las especies de árboles y arbustos (Jolly y Johnson 2018, Nolan *et al.* 2018). Además, varios autores han señalado que las respuestas fisiológicas de las plantas en situación de estrés hídrico (Nolan *et al.* 2020; Pellizzaro *et al.* 2007) constituyen un factor clave de importancia en la combustibilidad de la biomasa forestal (Käse 1969; Nesterov 1949; Reinhard *et al.* 2005; Sancho & Quílez 2007; Thornthwaite 1948).

En este contexto, varios autores (Nolan 2016; Resco de Dios 2015; Sancho & Quílez 2007; Sullivan 2009) han considerado que monitorear y pronosticar el contenido de humedad del combustible vivo (LFMC) y el estado fenológico de la vegetación es de vital importancia para realizar evaluaciones de riesgo de incendios forestales, evaluar las condiciones para las quemaduras prescritas y modelar el comportamiento del fuego. Por lo tanto, dada esta influencia, muchos autores han considerado necesario ampliar el conocimiento sobre el estado fenológico y contenido de humedad de las diferentes especies presentes en el ecosistema, conocer su magnitud y su variación estacional, y comprender y predecir el comportamiento del fuego (Sancho & Quílez 2007), proponiendo varias tecnologías innovadoras (Gale *et al.* 2021; Wilson *et al.* 2021; Zapata *et al.* 2021; Zapata *et al.* 2022).

Los enfoques actuales para estimar el LFMC se centran en modelar el contenido de humedad a partir de índices de sequía o mediante el modelado por uso de datos obtenidos a través de sensores remotos (Nolan *et al.* 2018; Yebra *et al.* 2013). Sin embargo, Jolly & Johnson (2018) y Nolan *et al.* (2018) defienden que los índices de sequía pueden ser difíciles de aplicar, ya que no capturan las diferentes respuestas a la sequía entre las especies. Incluso Nolan (2018) destaca que los enfoques actuales de teledetección remota no se pueden usar para pronosticar LFMC. Por lo que,

actualmente, Sancho & Moraga (2007), Nolan *et al.* (2018) y Zapata *et al.* (2022) apuestan por un enfoque ecofisiológico para investigar la dinámica de LFMC, ya que éste puede superar estas limitaciones y conducir a un mejor modelado.

Al mismo tiempo, también se han centrado esfuerzos en investigación en el monitoreo del estado fenológico de las plantas (principalmente de árboles y arbustos). Para ello, la comunidad científica ha estado analizando diferentes características hidráulicas de las plantas, como la medición del flujo de savia, la cual se aplica para la evaluación de las tasas de transpiración (Smith & Allen 1996). Sin embargo, algunos autores afirman que las mediciones del flujo de savia solo brindan información sobre el movimiento del agua dentro de las plantas y no están directamente relacionadas con las respuestas rápidas al estrés climático (Park *et al.* 2018). Otra técnica desarrollada para el desarrollo de un modelo de LFMC está basada en el potencial hídrico de la hoja antes del amanecer (Nolan *et al.* 2018), pero se encontró con el problema de que no todas las especies mantienen un equilibrio entre el potencial hídrico del suelo y antes del amanecer, con la acumulación de solutos en la hoja y la transpiración nocturna modificando esta relación (Donovan *et al.* 2001; Nolan *et al.* 2018). Pero, aunque existe una base fisiológica clara para el acceso a los recursos hídricos, el potencial hídrico, la regulación estomática y los ajustes osmóticos y elásticos, el contenido de humedad saturada, la rigidez de la pared celular o el punto de pérdida de turgencia, el potencial soluto celular, la fracción de agua simplástica y la capacitancia tisular, en el control de la dinámica de LFMC, ha habido poca investigación que examine explícitamente estas relaciones, ya que estas técnicas presentan una dificultad destacada para la aplicación en el monitoreo continuo de la vegetación (Scarff *et al.* 2021).

En la actualidad, la técnica de evaluación de la variación de LFMC con mayor aplicación ha sido la medición de humedad en laboratorio de muestras recogidas en campo (Sancho & Quílez 2007), lo que conlleva la dificultad del mantenimiento y transporte de las probetas extraídas en el monte hasta el laboratorio y los costes asociados al trabajo de campo y trabajo de laboratorio. Sin embargo, otros autores como Love *et al.* (2008), Gora & Yanoviak (2015), Gibert *et al.* (2006), Koppán *et al.* (2002) o Hao *et al.* (2021) han estado recopilando datos acerca de medición del potencial eléctrico como indicador de la actividad fisiológica, llegando a proponer el estudio electrofisiológico arbóreo como un método con futuro para la evaluación del estado fenológico y las respuestas al estrés de árboles y arbustos (Hao *et al.* 2021), siendo éste uno de los motivos para el desarrollo del presente trabajo.

1.2.3. Avances en electrofisiología aplicada

La electrofisiología es la ciencia que estudia las propiedades eléctricas de las células y el tejido biológico de un organismo (Camacho Crespo *et al.* 2016). Frente a los organismos vegetales, la electrofisiología ha avanzado y se ha ido aplicando mucho más sobre animales y humanos. Así, uno de los primeros científicos en estudiar las corrientes eléctricas en animales fue el físico italiano Carlo Matteucci entre 1845 y 1860 (Piccolino & Wade 2012)., seguido por el fisiólogo suizo Wilhelm His en 1893, que comenzó el estudio en materia de electrofisiología cardiaca (Tubbs *et al.* 2009).

En la actualidad esta especialidad científica se encuentra altamente desarrollada en la medicina, donde se han producido grandes avances y descubrimientos, permitiendo que el registro de la actividad eléctrica pueda darse con distintas técnicas de electrofisiología en diferentes tejidos biológicos y células, como es el aparato cardiaco, los músculos o el cerebro humano (Aso Poza 2019).

Así, por ejemplo, el registro de la actividad eléctrica del cerebro se realiza mediante una técnica de electrofisiología no invasiva, el electroencefalograma (EEG), a través de la utilización de pequeños electrodos fijados sobre el cuero cabelludo de la persona, permitiendo observar y estudiar el funcionamiento del sistema nervioso central y, más específicamente, la corteza cerebral (Alonso Acosta *et al.* 2014; Barreto Galeano 2014; Grave-de Peralta *et al.* 2004; Harmony 1990).

El electromiograma (EMG) es otra técnica de electrofisiología utilizada habitualmente en medicina que se emplea para estudiar la actividad eléctrica de los músculos. En este caso el registro de la señal eléctrica muscular se realiza mediante la inserción de electrodos en el tejido muscular que se quiere estudiar (Aso Poza U. (2019); Pedraza Moromenacho 2017; Villa-Hernández 2017).

Aunque, en la actualidad, dentro de la electrofisiología medica la especialidad que más avances ha generado es la electrofisiología cardiaca. Así, el electrocardiograma (ECG) es un estudio simple, no invasivo, que registra la actividad eléctrica del corazón. Este registro es la suma de pequeños cambios en la tensión extracelular, producidos por el movimiento de corrientes a través de canales en los miocitos cardiacos (Cordova Roca & Jauregui Tapia 1995). Las células miocárdicas son células musculares estriadas que pueden contraerse. Además de las células contráctiles del corazón, existen células miocárdicas especializadas en generar y conducir los estímulos eléctricos a todo el miocardio. Conforme el impulso se propaga por el corazón, la membrana de las células se despolariza y repolariza, lo que genera dipolos eléctricos: regiones con diferencias de carga en la superficie de las células (Lindgren & Jansson 1995; Thaler 2021). Los dipolos individuales se suman y generan vectores eléctricos que tienen magnitud,

dirección y sentido (Kenny 2008; Lindgren & Jansson 1995). Estos vectores representan corrientes que se conducen fácilmente por el líquido extracelular y que podemos registrar en la superficie del cuerpo mediante la utilización de electrodos adheridos a la piel de la persona y un equipo que registre las variaciones de tensión (Lindgren & Jansson 1995).

Este es el fundamento que se utilizó desde los inicios de la electrofisiología cardiaca en 1901 con el electrocardiógrafo de cuerda presentado por Einthoven (Kenny 2008; Lindgren & Jansson 1995). La electrocardiografía ha evolucionado gracias al descubrimiento de conocimiento basado en estudios, tanto *in vitro* como *in vivo*, y a la incorporación de tecnología cada vez más precisa. De forma que en la actualidad es posible realizar mapeos eléctricos tridimensionales endocárdicos mediante la utilización de catéteres intracardiacos multielectrodos que permiten el registrar los potenciales cardiacos, posibilitando la evaluación a tiempo real de cambios que se producen en la actividad cardiaca (Merino *et al.* 2008).

Fuera del mundo de la medicina, el estudio de las señales eléctricas en el reino vegetal comenzó con los trabajos de Burdon-Sanderson (1873) y Darwin (1875) los cuales pudieron observar actividad eléctrica en algunas plantas insectívoras. Posteriormente, primero Bose (1926) y luego Pickard (1973) evidenciaron la existencia de potenciales de acción en algunas plantas, con independencia de movimientos foliares rápidos. Ya en especies de porte arbóreo, se pudo detectar la existencia de una diferencia en el potencial eléctrico continuo entre los electrodos insertados en el floema del árbol y el suelo circundante, tal como demostraron Wright & Fisher (1981). Sin embargo, actualmente no existe un consenso acerca del origen de la actividad eléctrica en los árboles, habiéndose desarrollado varias hipótesis con fundamentos físicos y con base biológica.

Una de las hipótesis que explica la presencia de señales eléctricas en los árboles se fundamenta en el mecanismo de transpiración mediante el cual se extraen del suelo de forma continua agua, nutrientes y partículas cargadas hacia el xilema por transpiración (Fromm & Lautner 2007; Love *et al.* 2008). Esta extracción de elementos crearía un desequilibrio de pH entre el árbol y el suelo, lo que generaría una corriente eléctrica circulante entre diferentes partes de los árboles (Love *et al.* 2008). Diferentes autores han desarrollado diversos experimentos para apoyar esta hipótesis, por ejemplo, en el floema (Fromm & Lautner 2007), en el xilema y en las hojas (Love *et al.* 2008), así como otros elementos del árbol y el suelo adyacente (Gora & Yanoviak 2015).

Otros autores defienden la generación de la diferencia de potencial eléctrico de los árboles mediante una teoría puramente física basada en el fenómeno electrocinético,

mediante el cual se genera una corriente eléctrica causada por el movimiento de líquidos en un medio poroso (Gibert *et al.* 2006; Horwitz 1939).

Por otro lado, según explica la hipótesis biológica, en la evolución de los árboles éstos han desarrollado un sistema interno de comunicación entre las diferentes partes de las plantas mediante la electricidad (Oyarce & Gurovich 2010). La transmisión de las señales se realizaría a través de las células vivas de plantas activando diferentes respuestas fisiológicas a estímulos ambientales externos (Oyarce & Gurovich 2010). Según algunos autores (Fromm & Lautner 2007; Gelli *et al.* 1997; Mwesigwa *et al.* 2000; Oyarce & Gurovich 2010) la variación de las señales eléctricas depende de la intensidad de la estimulación externa que podría estar asociada a cambios en la tensión del agua o concentraciones de iones, lo que produciría un desequilibrio electroquímico transitorio. En este contexto, diversos estudios han reportado el efecto de diferentes estímulos, tales como condiciones de luz (Datta & Palit 2004; Gurovich & Hermosilla 2009), variaciones de temperatura (Rhodes *et al.* 1996; Pyatygin *et al.* 2008; Volkov *et al.* 2007) y heridas mecánicas (Oyarce & Gurovich 2010; Schaller & Oecking 1999).

1.3. Justificación de la investigación

Una aplicación potencial para la electrofisiología vegetal es la utilización de las propias plantas como biosensores. Esta idea ha empezado a estudiarse por diferentes autores, pero siempre en laboratorios de investigación en condiciones controladas (Gil *et al.* 2008; Gil *et al.* 2009; Ríos-Rojas *et al.* 2015; Volkov & Ranatunga 2006). Así, antes de la realización del presente trabajo de investigación, las únicas investigaciones publicadas por la comunidad científica sobre las señales eléctricas en organismos vegetales se limitaban en su mayoría a trabajos con especies generalmente agrícolas en condiciones de laboratorio (Gil *et al.* 2008; Gil *et al.* 2009; Oyarce & Gurovich 2010; Ríos-Rojas *et al.* 2015). Si bien es cierto que algunos autores sí estudiaron la diferencia de potencial eléctrico en árboles de carácter forestal, se llevaron a cabo principalmente en áreas climáticas de características muy diferentes al clima Mediterráneo, p.e, *Aesculus hippocastanum* (Morat *et al.* 1994) y *Populus nigra* (Gibert *et al.* 2006) ambos en Francia, *Eucalyptus globulus* en Portugal (Cardoso *et al.* 2004), *Salix alba* en Austria (Gindl *et al.* 1999) y *Quercus* spp. y *Fagus sylvatica* en Hungría (Koppán *et al.* 1999; Koppán 2004). Además, todos estos estudios se limitaron únicamente a analizar los datos de tensión o diferencia de potencial eléctrico en árboles individuales (Cardoso *et al.* 2004; Gibert *et al.* 2006).

En consecuencia, no se han encontrado análisis rigurosos de señales eléctricas relacionadas con especies de coníferas, ni con ecosistemas mediterráneos. Por estas razones, se considera justificada la realización de una investigación rigurosa que permita a la comunidad científica cubrir esta falta de conocimiento científico como base a futuros desarrollos tecnológicos, centrándonos en la caracterización y análisis de las señales eléctricas en condiciones naturales no controladas y explorando el comportamiento de los dos componentes de las señales eléctricas (corriente de corto circuito *ISC* y tensión *V*) en una población representativa de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) en el área mediterránea.

Por otro lado, y con la finalidad del uso de los árboles (principalmente pinos) del bosque mediterráneo como elemento de alerta ante el riesgo de incendio, varios autores han estudiado el estado fenológico de la vegetación midiendo directamente el contenido de humedad del combustible vivo (LFMC) mediante la toma de muestras físicas en campo (Countryman 1979; Sancho & Quílez 2017). A través de estos trabajos se logró relacionar el estado fenológico de las plantas con su correspondiente contenido de humedad, al menos en gran parte de las especies que habitan los montes mediterráneos (Sancho & Moraga 2017). Sin embargo, para una de las especies arbóreas más importantes de la cuenca mediterránea, como es el *Pinus halepensis* (EUFORGEN 2009; Fady *et al.* 2003; IFN3 2007; de Luis *et al.* 2013; Mauri *et al.* 2016;

Pausas *et al.* 2004), los resultados sobre la variación de la humedad estacional no fueron concluyentes (Sancho & Quílez 2017), dado que *Pinus halepensis* apenas muestra variación en el contenido de humedad a lo largo del ciclo vegetativo. Tampoco muestra variaciones de humedad ante los episodios de calor extremo y sequía que habitualmente se registran en el área mediterránea de Europa Occidental (Sancho & Quílez 2017).

Teniendo en cuenta la creciente importancia de *Pinus halepensis* en los bosques mediterráneos europeos y sus procesos de expansión por adaptación a condiciones climáticas y de estación más rigurosas (EUFORGEN 2009; Fady *et al.* 2003; IFN3 2007; de Luis *et al.* 2013; Mauri *et al.* 2016; Pausas *et al.* 2004; Sancho & Quílez 2017), así como la dificultad de conocer el estado fenológico de esta especie (Sancho & Quílez 2017), se ha considerado como necesario focalizar el presente trabajo en el estudio de señales eléctricas en los *Pinus halepensis* como indicador para complementar la evaluación de la humedad del combustible vivo (LFMC), como método para monitorear el estado fenológico y el nivel de estrés por sequía, sirviendo como referencia en la evaluación del riesgo de incendios forestales.

2. OBJETIVOS

En esta sección se describen los objetivos de esta investigación, definiendo tanto el objetivo general como los objetivos específicos y operativos que se han buscado en la presente tesis.

2.1. Objetivo general

El objetivo general de la investigación es avanzar en el conocimiento científico de la actividad fisiológica del *Pinus halepensis* en situaciones de estrés hídrico en base al comportamiento de los parámetros electrofisiológicos más importantes (corriente de cortocircuito *ISC* y tensión *V*), con el fin último de explorar nuevas posibilidades para el desarrollo de sensores terrestres, basados en la medición de estos parámetros electrofisiológicos vegetales, que permitan monitorear en línea el riesgo de ignición y el riesgo de propagación de los fuegos forestales con una resolución espacial y temporal potencialmente máxima.

2.2. Objetivos específicos

Para alcanzar el objetivo general, la investigación cuenta con los siguientes objetivos específicos (OE), correspondiendo a cada uno a los capítulos de la tesis.

OE1. Evaluar de los factores estáticos más significativos que influyen en la señal electrofisiológica que se registra en *Pinus halepensis*, en condiciones naturales.

OE2. Analizar la evolución temporal de la señal electrofisiológica registrada en un muestreo de *Pinus halepensis* en un ecosistema mediterráneo representativo.

OE3. Evaluar la respuesta electrofisiológica del *Pinus halepensis* como indicador de riesgo de incendios forestales en los bosques mediterráneos complementando la humedad del combustible vivo.

2.3. Objetivos operativos

Los tres objetivos específicos descritos se alcanzan por los objetivos operativos (OO) de la investigación, que se estructuran en los tres capítulos de la tesis.

Los objetivos operativos del Capítulo I (Evaluar los factores estáticos más significativos que influyen en la señal electrofisiológica que se registra en *Pinus halepensis*, en condiciones naturales) son:

OOI1. Estudiar la influencia específica de la edad del árbol en su respuesta electrofisiológica.

OOI2. Estudiar la distribución que presenta la tensión (V) y la corriente de cortocircuito (ISC), bajo la influencia de la ubicación de los electrodos sobre el fuste del árbol (altura y orientación).

OOI3. Estudiar la señal eléctrica que se puede registrar en el árbol, bajo la influencia de la configuración de medición (bipolar o referenciada a tierra).

Los objetivos operativos del Capítulo II (Analizar la evolución temporal de la señal electrofisiológica registrada en un muestreo de *Pinus halepensis* en un ecosistema mediterráneo representativo) son:

OOII1. Detectar y analizar las variaciones estacionales de las señales electrofisiológicas de *Pinus halepensis* en un ecosistema mediterráneo.

OOII2. Detectar y analizar las variaciones diurnas y nocturnas de las señales electrofisiológicas de *Pinus halepensis* en un ecosistema mediterráneo.

Los objetivos operativos del Capítulo III (Evaluar la respuesta electrofisiológica del *Pinus halepensis* como indicador de riesgo de incendios forestales en los bosques mediterráneos complementando la humedad del combustible vivo) son:

OOIII1. Analizar la relación entre los resultados obtenidos para las señales electrofisiológicas y la calificación de riesgo de incendios forestales más utilizada por las agencias de extinción de incendios.

OOIII2. Evaluar la posibilidad de implementar las respuestas de señales electrofisiológicas de *Pinus halepensis* para complementar la evaluación de la humedad del combustible vivo, como método para monitorear el estado fenológico y el nivel de estrés por sequía.

3. ESTRUCTURA DE LA TESIS

El presente documento está formado por diez secciones con el siguiente contenido:

1. La primera sección comprende la introducción general de la tesis donde se describe la motivación de la investigación realizada, el estado del arte de la temática tratada y la justificación de la investigación.

2. La segunda sección describe los objetivos de la investigación. En ella se definen el objetivo general, los objetivos específicos que se han establecido para lograr alcanzar el objetivo general, así como los objetivos operativos que se han seguido a fin de lograr el objetivo general de la investigación.

3. La tercera sección describe la estructura de la tesis y el contenido de cada una de las secciones que la componen.

4-6. Las secciones de la cuatro a la seis conforman los tres capítulos que abordan los tres objetivos específicos de la investigación. Cada una de estas secciones cuenta con su propia estructura siguiendo el método científico: introducción, objetivos, material y métodos, resultados, discusión y conclusiones.

7. La séptima sección recoge las conclusiones generales de la investigación realizada en base al conocimiento científico adquirido durante toda la fase de desarrollo de la tesis.

8. La octava sección recoge varias propuestas de futuras investigaciones, basadas en la línea de trabajo abierta con la presente investigación, que permitan el desarrollo y mejora de la monitorización de los bosques mediterráneos y su riesgo ante incendios forestales mediante la electrofisiología vegetal.

9. La novena sección enumera los diferentes elementos de transferencia de los resultados de la investigación logrados y se citan cada uno de los elementos científicos publicados a partir de la investigación, clasificados en publicaciones en revistas científicas revisadas por pares y comunicaciones en congresos científicos tanto nacionales como internacionales.

10. La décima sección recoge todas las referencias bibliográficas citadas en todo el documento de la tesis.

A estas diez secciones, que componen el cuerpo de la memoria de la tesis, se le añaden 3 anexos:

Anexo I: Publicación en la que se basa el capítulo 1 de la presente tesis; Rodolfo Zapata, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Lenin-Guillermo Lemus- Zúñiga, Jorge E. Luzuriaga , Miguel A. Mateo Pla & Javier F. Urchueguía (2020): Evaluation of electrical signals in pine trees in a mediterranean forest ecosystem, *Plant Signaling & Behavior* 15(10): 1795580. DOI: 10.1080/15592324.2020.179558

Anexo II: Publicación en la que se basa el capítulo 2 de la presente tesis; Rodolfo Zapata, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga, David Fuente, Miguel A. Mateo Pla, Jorge E. Luzuriaga & Juan Carlos Moreno Esteve (2021): Seasonal variations of electrical signals of *Pinushalepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions, *Plant Signaling & Behavior* 16(10):1948744. DOI: 10.1080/15592324.2021.1948744

Anexo III: Publicación en la que se basa el capítulo 3 de la presente tesis; Rodolfo Zapata, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga, Miguel A. Mateo Pla, & Jorge E. Luzuriaga (2022): Electrical responses of *Pinus halepensis* Mill. as an indicator of wildfire risk in Mediterranean forests by momplementing live fuel moisture. *Forests* 13:1189. DOI: 10.3390/f13081189

4. CAPÍTULO 1

Evaluación de la señal electrofisiológica en pinos dentro de un ecosistema Mediterráneo

Publicación de referencia:

Rodolfo Zapata, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Lenin-Guillermo Lemus- Zúñiga , Jorge E. Luzuriaga , Miguel A. Mateo Pla & Javier F. Urchuguía (2020): Evaluation of electrical signals in pine trees in a mediterranean forest ecosystem, *Plant Signaling & Behavior* 15(10): 1795580. DOI: 10.1080/15592324.2020.1795580

Ver ANEXO I

4.1. Introducción

Las plantas tienen actividad eléctrica. Este hecho fue revelado por primera vez por Burdon-Sanderson (1873) y Darwin (1875) al observar plantas insectívoras. Bose (2011) y luego Pickard (1973) evidenciaron la existencia de actividad eléctrica en algunas plantas en condiciones controladas de laboratorio, independientemente de la presencia de movimientos rápidos de las hojas. En cuanto a los árboles, Wright & Fisher (1981) detectaron la existencia de una diferencia de potencial eléctrico continuo entre los electrodos insertados en el floema del árbol y el suelo circundante.

Existen tanto hipótesis físicas como biológicas para explicar el origen de las señales eléctricas medidas en las plantas que han sido documentadas científicamente.

Por un lado, la hipótesis biológica establece que diferentes partes de las plantas desarrollaron, en su evolución, un sistema de comunicación interno, mediante el cual la transmisión de señales eléctricas a nivel celular activa respuestas fisiológicas a estímulos ambientales externos (Oyarce & Gurovich 2010). En este contexto, diferentes estudios han reportado el efecto de diferentes estímulos, tales como condiciones de luz (Datta & Palit 2004; Gurovich & Hermosilla 2009), variaciones de temperatura (Brenner *et al.* 2006, Datta & Palit 2004; Gurovich & Hermosilla 2009; Pyatygin *et al.* 2008; Rhodes *et al.* 1996; Volkov *et al.* 2007; Zimmermann *et al.* 2009) y afecciones patológicas o heridas mecánicas (Oyarce & Gurovich 2010; Schaller & Oecking 1999).

Según algunos autores (Fromm & 2007; Gelli *et al.* 1997; Mwesigwa *et al.* 2000; Oyarce & Gurovich 2010; Stankovic *et al.* 1997), la variación de las señales eléctricas depende de la intensidad de la estimulación, la cual podría estar asociada a cambios en la tensión del agua o en las concentraciones de iones, creando un desequilibrio electroquímico transitorio. Estas señales eléctricas se transmitirían a través de las células vivas de las plantas. La comprensión de los mecanismos de las respuestas eléctricas, los cambios en los procesos fisiológicos y la predicción de las respuestas a los factores de estrés requieren la modelización matemática de la actividad eléctrica en los organismos vegetales. Una revisión de tales modelos se puede encontrar en Sukhova *et al.* (2017).

Por otro lado, la hipótesis física se basa en el hecho de que los árboles succionan continuamente agua, nutrientes y partículas cargadas hacia el xilema mediante la transpiración (Fromm & Lautner 2007; Love *et al.* 2008). En este proceso se crea un desequilibrio de pH entre el árbol y el suelo, lo que provoca una corriente eléctrica que circula entre diferentes partes de los árboles (Love *et al.* 2008). En diferentes estudios

se han realizado varios experimentos que apoyan esta hipótesis, por ejemplo, en el floema (Fromm & Lautner 2007), en el xilema y las hojas (Love *et al.* 2008), así como en otros elementos del árbol vivo y el suelo adyacente (Gora & Yanoviak 2015).

Otra teoría física se basa en el hecho de que la corriente eléctrica es el resultado del fenómeno electrocinético, causado por el movimiento de líquidos en un medio poroso (Horwitz 1939; Gibert *et al.* 2006). Para desarrollar y analizar los modelos físicos que subyacen a este potencial, es necesario realizar los experimentos en las condiciones controladas en laboratorio. Además, se han realizado varios trabajos con especies agrícolas en condiciones de laboratorio (Gil *et al.* 2008; Gil *et al.* 2009; Oyarce & Gurovich 2010; Ríos-Rojas *et al.* 2015). También hay que tener en cuenta que algunos de estos estudios se limitan a analizar únicamente los datos de tensión, no contemplando la ISC (Cardoso *et al.* 2004; Gibert *et al.* 2006).

Todos estos requisitos dificultan las investigaciones sobre árboles en bosques, lo que podría explicar el reducido número de publicaciones encontradas. Por ejemplo, los estudios de (Gora & Yanoviak 2015; Koppán 2002; Le Mouël *et al.* 2010; Love *et al.* 2008) observaron señales eléctricas en árboles individuales, lo que no permite analizar la variabilidad entre individuos en un ecosistema forestal. Además, las pocas investigaciones que hemos podido documentar se han realizado principalmente en zonas climáticas continentales y centroeuropeas, por ejemplo, *Aesculus hippocastanum* (Morat *et al.* 1994) y *Populus nigra* (Gibert *et al.* 2006) ambos en Francia, *Eucalyptus globulus* en Portugal (Cardoso *et al.* 2004), *Salix alba* en Austria (Gindl *et al.* 1999) y *Quercus* spp. y *Fagus sylvatica* en Hungría (Koppán *et al.* 1999; Koppán 2004).

En consecuencia, no se ha encontrado un análisis riguroso de las señales eléctricas relacionadas ni con las especies de coníferas ni con los ecosistemas forestales mediterráneos. Por estas razones, el presente estudio pretende cubrir esta carencia de conocimiento, centrándose en la caracterización y análisis de las señales eléctricas en condiciones naturales (fuera de laboratorio). Para ello se explora el comportamiento de los dos componentes de las señales eléctricas (ISC y tensión *V*) en una población representativa de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) del área mediterránea, concretamente en la Sierra Calderona en la Comunidad Valenciana.

Una aplicación adecuada de estas medidas de señales eléctricas es la idea de utilizar las plantas como biosensores. Esta idea ha sido estudiada por otros autores en laboratorios de investigación bajo condiciones controladas (Gil *et al.* 2008; Gil *et al.* 2009; Ríos-Rojas *et al.* 2015; Volkov & Ranatunga 2006). Para utilizar árboles en el medio natural como biosensores tenemos que enfrentarnos al problema de la falta de información sobre señales eléctricas en condiciones naturales no controladas. Por ello, consideramos necesario crear una buena base de investigación sobre el

comportamiento de esas señales eléctricas de los árboles, tanto estática como dinámicamente.

En el presente trabajo, hemos evaluado los factores estáticos más significativos que influyen en la distribución de las señales eléctricas de tensión V y corriente de cortocircuito ISC , concretamente:

- i) la influencia de la edad del árbol,
- ii) la colocación de los electrodos (altura y orientación de la asignación) y
- iii) los ajustes de medición (configuraciones bipolares o referenciadas al suelo).

4.2. Material y métodos

A continuación, se describen los principales materiales y métodos utilizados en este estudio, realizado fuera de laboratorio, sobre un muestreo en pinos pertenecientes a un ecosistema forestal mediterráneo representativo.

4.2.1. Selección de la parcela de estudio

Las coníferas son muy representativas del área mediterránea, y una de las más importantes es el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) (AAVV 2009; de Luis *et al.* 2013; Fady *et al.* 2003; Mauri *et al.* 2016; Pausas *et al.* 2004). Sondeamos una serie de bosques potenciales para este estudio utilizando diferentes capas del Sistema de Información Geográfica (SIG) del tercer y último Inventario Forestal Nacional de España (IFN3 2007). Buscamos rodales maduros de *Pinus halepensis* en el Este de España, concretamente en el sur de Catalunya, sur de Aragón, Este de Castilla-La Mancha, Este de Andalucía, así como en la totalidad de la Comunidad Valenciana y la Región de Murcia. Debido al diferente comportamiento fisiológico de los árboles en función de la edad (Dorado Liñán *et al.* 2012; Fromm & Lautner 2007), incluimos la edad del árbol como variable crítica en el diseño de la investigación y en la selección de las parcelas de estudio. Así, para aceptar una población arbórea representativa en estos bosques, consideramos las siguientes características forestales, que han ido actuando como filtros en las capas SIG.:

- A. Una población arbórea de la misma especie (rodales puros),
- B. Una superficie superior a 10 ha
- C. Suficientes ejemplares para cada grupo de edad,
- D. No afectada (al menos en los últimos años) por perturbaciones medioambientales importantes (incendios forestales, plagas o daños por nieve).

Cruzando todas las capas del SIG con estas consideraciones se encontraron casi 50 parcelas de estudio que cumplieran con todos los requisitos de selección, tomando como representativo una parcela en el Parque Natural de la Sierra Calderona, situado en la provincia de Valencia. El área elegida, de aproximadamente 20 hectáreas,

contiene rodales puros de pino carrasco. Los árboles muestran pertenencia clara a dos clases de edad diferentes, situadas muy próximas entre sí. Las condiciones de la estación son homogéneas, así estos árboles mantienen las mismas condiciones edafológicas, régimen de insolación, orientación y disponibilidad de agua.

Las dos clases de edad son:

- A. Árboles jóvenes: rodales de regeneración natural de unos 26 años originados tras un incendio forestal en 1994 (Moliner 2004).
- B. Árboles maduros: rodales puros de edad uniforme, que fueron repoblados hace unos 50 años y sobrevivieron al incendio forestal de 1994.

El rodal seleccionado para los ensayos dentro de la parcela de estudio tiene un tamaño aproximado de 0,25 hectáreas y está situado en la latitud 39° 45' 28,80" N y la longitud 0° 30' 36,36" O. La figura 5 muestra la naturaleza del área de estudio.

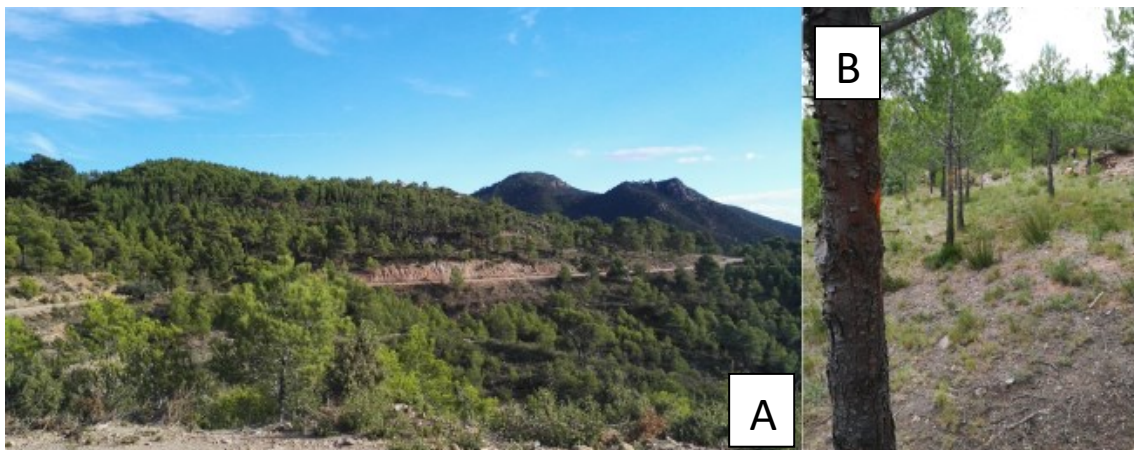


Figura 5: Localización de la zona de estudio: (A) vista panorámica del rodal en estudio, (B) distanciamiento de los árboles en el rodal de muestra.

4.2.2. Selección de árboles representativos

En el rodal seleccionado se inventariaron un total de 121 árboles. Se han medido los principales parámetros dendrométricos (Saket *et al.* 2004), es decir, el diámetro a la altura del pecho (DAP a 1,3 m) y la altura total del árbol (h_t). Los resultados de este inventario se resumen en la tabla 1.

Tabla 1. Parámetros dendrométricos del rodal seleccionado para los ensayos: diámetro a la altura del pecho (DAP) y altura total del árbol (h_t).

	Diámetro altura pecho DAP [cm]	Altura total del árbol h_t [m]
Media	12.10	5.16
Mediana	11.10	5.13
Máximo	25.10	9.69
Mínimo	6.4	2.77
Desviación típica	3.95	1.30
Varianza	15.59	1.68
Número de muestras	121	

Seguindo las recomendaciones de Fernández-Puratich (2013), Oliver-Villanueva (1993) y Hapla (2000), se descartaron del estudio aquellos árboles que:

- i) estuvieran situados en el borde de la parcela,
- ii) hubieran crecido con fustes excesivamente curvados o
- iii) presentaran afecciones de hongos o insectos.

Además, siguiendo las recomendaciones de Ríos-Rojas (2015), para una primera fase del estudio se seleccionaron aleatoriamente diferentes muestras patrón: dos árboles maduros, dos árboles jóvenes y un árbol muerto en pie. Esta fase se centró en las medidas de ISC y tensión en función de la edad del árbol.

En la segunda fase del estudio, realizamos un análisis estadístico para determinar el tamaño de la población siguiendo la metodología descrita por Hapla & Saborowski (1987). Estos autores realizaron varias mediciones a diferentes alturas de los árboles demostrando que, si la altura y el diámetro de los árboles no difieren más de un intervalo de confianza, el aumento del número de muestras no mejora significativamente los resultados. Para esta fase, nuestra población de árboles se redujo a 15 árboles representativos, para alcanzar un intervalo de confianza del 95%, teniendo en cuenta los criterios de selección utilizados en diferentes estudios relacionados con las características de la madera y las propiedades físicas de varias especies de árboles (Hapla *et al.* 2000; Dix *et al.* 1992; Oliver-Villanueva & Becker 1993; Peters 1996; Sauter 1992; Seeling 1991; Wobst 1995;). Los árboles seleccionados reúnen las siguientes características.

1. La altura y el diámetro no difieren más de una desviación típica de los valores medios.
2. Pertenecen a la clase sociológica I de KRAFT (árboles dominantes) o a la clase II (árboles codominantes).

3. Sin daños o enfermedades significativas o apreciables presentes en el fuste.
4. Distribuidos homogéneamente por toda la superficie de la parcela, para conseguir una mayor diversidad de resultados.
5. Pertenecer al mismo grupo de edad y con suficiente nivel de actividad eléctrica (medido en la fase 1 del estudio).

4.2.3. Equipos de medición

Los parámetros eléctricos se midieron con un multímetro UT71D UNI-T con una impedancia de entrada de $2,5 \text{ G}\Omega$, y precisión de $0,1\% \pm 2$ milivoltios (mV), como el utilizado en otros estudios (Krcmar *et al.* 2019; Wang & Zhang 2019).

Se utilizaron electrodos extracelulares de acero inoxidable como en trabajos anteriores (Gibert *et al.* 2006). Para eliminar, en la medida de lo posible, los sobrepotenciales de medición inducidos por el efecto galvánico en las mediciones bipolares, nos aseguramos de que todos nuestros electrodos estuvieran fabricados con el mismo material.

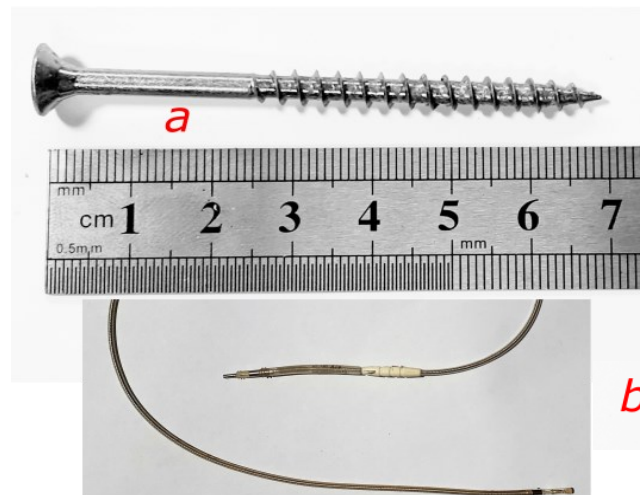


Figura 6. Equipo utilizado para la medición de las señales eléctricas (a) tornillo de 70 mm como electrodo, (b) electrodo para referencia a tierra.

Elegimos tornillos como electrodos, ya que pueden insertarse y extraerse fácilmente de los árboles, causando una mínima herida. Además, debido a su rosca, los tornillos tienen una mayor superficie de contacto que los electrodos lisos.

Para las mediciones referenciadas a tierra, como conexión a tierra del circuito, se utilizó un electrodo de aleación de platino-iridio (Pt-Ir) recubierto de nitruro de titanio (TiN) (Comisión Europea 1999). Se utilizaron electrodos de no polarización como tierra para minimizar los falsos resultados inducidos por las cargas que cruzan libremente entre la interfaz electrodo-electrolito siguiendo las experiencias de Prutchi (2005). Cada electrodo se conectó con el equipo de medida a través de un conector eléctrico y un cable conductor de cobre de 0,5 mm aislado con un revestimiento de plástico flexible según normativa europea. La figura 6 muestra los materiales y el equipo utilizados.

4.2.4. Variables electrofisiológicas

Las dos variables electrofisiológicas registradas por los equipos de medición son:

a) Corriente de cortocircuito I_{SC}

Desde el punto de vista eléctrico, un cortocircuito es la conexión, mediante una resistencia muy baja, de dos puntos de un circuito que está operando en condiciones normales de tensión (Ramos 2011). El resultado del cortocircuito es el flujo de corriente máximo que el sistema puede suministrar (Spence 2008), siendo esta corriente la cantidad de carga eléctrica que atraviesa una superficie cada unidad de tiempo (Bhavishya et al. 2020). La unidad de intensidad es el culombio por segundo (C/s), denominado Amperio (A) (Quintela & Redondo Melchor 2006)

b) Tensión eléctrica V

La tensión eléctrica es una magnitud física que cuantifica la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos, cuya unidad es el Voltio (V). También se puede definir como el trabajo por unidad de carga ejercido por el campo eléctrico sobre una partícula cargada para moverla entre dos posiciones determinadas. (Quintela & Redondo Melchor 2006)

Cuando hablamos sobre una tensión en un solo punto, nos referimos a la diferencia de potencial entre este punto y algún otro donde el potencial se defina como cero, adoptando como potencial nulo al de la tierra. (Lévy 2004; Salomonsson et al. 2009).

4.2.5. Colocación de electrodos y medición

Para registrar la *ISC* y tensión de los árboles en estudio, se insertaron electrodos directamente en el fuste en contacto con el tejido floemático. Esto se aseguró insertando los electrodos utilizando una llave dinamométrica que nos permitió detectar el cambio de dureza. Según otros autores, el floema (Oyarce & Gurovich 2010) desempeña un papel activo en la respuesta eléctrica de los árboles. Oyarce & Gurovich (2010) demostraron que las células vivas que componen estas zonas ofrecen menor resistencia al flujo eléctrico en comparación con el resto de los tejidos de la planta.

Colocamos los electrodos en una distribución circular y longitudinal para determinar la distribución de las variables electrofisiológicas (tensión *V* y corriente de cortocircuito *ISC*) a lo largo del fuste de cada árbol.

- a) En la configuración en anillo circular, los electrodos se colocaron a 1,5 m del suelo en los cuatro puntos cardinales (norte, este, sur y oeste). Se utilizó la brújula para seleccionar la orientación de las caras de los árboles donde se insertaron los electrodos, como se muestra en la figura 7 (izquierda y centro).
- b) En la configuración longitudinal, los electrodos se insertaron longitudinalmente en los árboles cada 50 cm, siguiendo una línea longitudinal en la cara norte del fuste. La figura 7 (derecha) muestra esta configuración. El electrodo de baja polarización se enterró 15 cm en el suelo mineral (descartando la capa de tierra vegetal), a una distancia mínima de 3 m del árbol para utilizarlo como electrodo de tierra o de referencia.



Figura 7. Colocación de los electrodos mediante brújula (izquierda), identificación de los árboles y ubicación radial de los electrodos (centro), electrodos separados longitudinalmente (derecha).

La colocación de electrodos utilizada fue la misma en modo bipolar que referenciada a tierra, cambiando únicamente la conexión de los electrodos. Así, las mediciones referenciadas a tierra se realizaron entre cada electrodo relativo al suelo. Por otro lado, las mediciones bipolares se realizaron entre dos electrodos próximos, con una separación fija de 0,5 m entre ellos. El primer nivel fue desde el electrodo situado a pie del fuste hasta el situado a 0,5 m de altura, el siguiente nivel fue desde 0,5 m hasta 1 m, continuando así, hasta tres metros de altura en el fuste. La figura 8 muestra un diagrama de esta configuración.



Figura 8. Modos de colocación de los electrodos (izquierda) mediciones referenciadas a tierra, (derecha) configuración bipolar.

4.2.6. Condiciones experimentales

La recogida de datos se realizó mediante mediciones directas conectando el equipo de medición a los electrodos insertados en los árboles. Con la intención de que los datos recogidos no se vieran afectados por variables externas, se siguieron las dos premisas siguientes.

a) En primer lugar, dado que provocamos una pequeña herida en los fustes mediante la inserción de los electrodos, los árboles respondieron a esta herida formando zonas de borde y barreras de compartimentación para evitar la infección y resistir a la propagación de agentes biodegradadores de la madera, bien hongos o insectos xilófagos (Woodward & Pearce 1988). Generalmente, a los 24 días de la creación de la herida, aparece un primer tejido protector aproximadamente de 1 mm en los bordes de la herida (Mullick 1975; Woodward & Pearce 1988). En las coníferas, el tejido y la secreción de resinas crea una capa impermeable entre 28 y 30 días después de la lesión, denominada peridermo necrofiláctico (Woodward & Pearce 1988). Siguiendo esto, realizamos nuestro estudio después de dejar tiempo suficiente

para la generación de este peridermo necrofiláctico en las heridas provocadas por la incisión de los electrodos.

b) En segundo lugar, siguiendo la bibliografía científica de referencia, debemos tener en cuenta que las condiciones ambientales afectan al comportamiento de la planta y generan cambios en la tensión (Abbott & Crossley 1982; Fensom 1963; Le Mouël *et al.* 2010; Ríos-Rojas *et al.* 2015). Para evitar que factores externos incontrolables puedan influir en nuestras observaciones, realizamos las mediciones del trabajo de campo en días con humedad y temperatura similares, principalmente en días despejados y sin nubes. Todas las mediciones se realizaron en la hora del cenit (entre las 13:30 y las 14:00 horas CET). La decisión de realizar las mediciones a esta hora se basó en la mayor incidencia solar, la menor presencia de nubes y la mayor estabilidad atmosférica.

4.2.7. Análisis estadístico

Se analizaron todos los datos recogidos de tensión e *ISC*. Se realizaron pruebas de distribución normal, homocedasticidad de la varianza y ANOVA. El concepto de homocedasticidad de los datos implica la constancia en la varianza de los errores, y se utiliza para garantizar la predicción de una variable calculando el valor medio de su conjunto (Field 2013). En nuestro caso, tras comprobar si los datos siguen una distribución normal se aplicó la prueba paramétrica t-Student. En el caso de no observar distribución normal se aplicó la prueba U de Mann-Whitney. Esto permite evaluar la comparación entre las dos edades de los árboles, así como entre los datos bipolares y los referenciados a tierra para dos muestras.

Además, en el caso de tres o más muestras se realizó un análisis de la varianza (ANOVA), tras comprobar la distribución normal de las muestras, por ejemplo, para el análisis de los datos obtenidos en las orientaciones norte, este, sur y oeste (N, E, S, O). Además, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis para comprobar la heterogeneidad y las diferencias significativas de los datos.

4.3. Resultados

4.3.1. Influencia de la edad del árbol

La tabla 2 muestra los resultados obtenidos para árboles jóvenes y maduros. Además, esta tabla también muestra una influencia significativa de la edad del árbol en las mediciones referenciadas al suelo. En primer lugar, se puede observar la existencia de una diferencia significativa entre los grupos de edad (valor $p < 0,0001$), con una tensión media de $V = 0,929$ V en los árboles jóvenes y de $V = 0,238$ V en los árboles maduros. Por otro lado, las mediciones bipolares muestran una tensión media de $V = 0,010$ V y $V = 0,014$ V para árboles jóvenes y maduros, respectivamente. En las mediciones bipolares, la diferencia de edad no muestra diferencias significativas entre los grupos (valor $p = 0,45$).

Tabla 2. Resumen de observaciones utilizando diferentes configuraciones sobre grupos de árboles maduros y jóvenes, voltios como unidad de medida.

Medición	Grupo	Max	Min	Media	std
Medidas referenciadas a tierra	Joven	-0.887	-1.016	-0.929	0.024
	Maduro	-0.222	-0.261	-0.238	0.013
Bipolar	Joven	0.033	0	0.010	0.008
	Maduro	0.148	0	0.014	0.027
Media de las mediciones referenciadas a tierra 24h	Joven	-0.223	-0.626	-0.383	0.100
	Maduro	-0.012	-0.295	-0.150	0.073

La figura 9 muestra los principales resultados obtenidos en 24 horas de mediciones referenciadas al suelo. la tensión media en los árboles jóvenes es de $V = 0,383$ V con un valor máximo de $0,626$ V. Los árboles maduros muestran valores significativamente más bajos que los árboles jóvenes (valor $p < 0,0001$) con una tensión media de $V = 0,150$ V y un valor máximo de $V = 0,295$ V. El árbol muerto de control muestra valores de $V = 0$ V, como era de esperar.

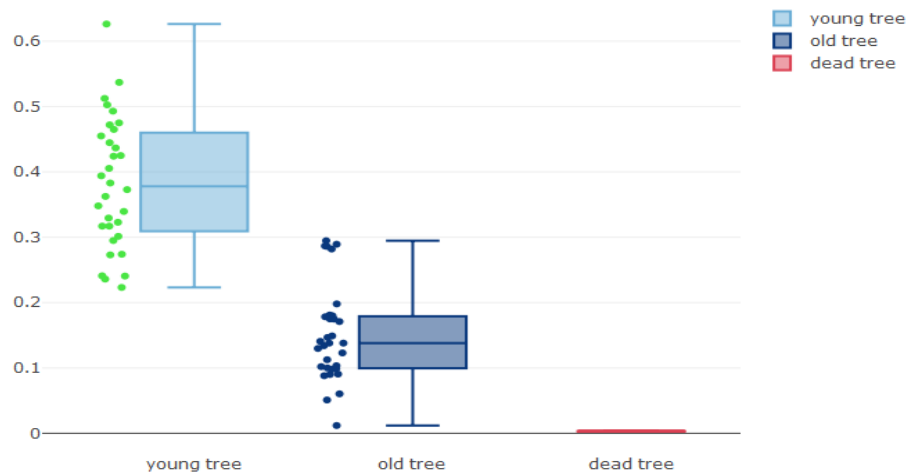


Figura 9. Boxplots que presentan la dispersión de los datos para las mediciones de 24h en árboles jóvenes, viejos y muertos. Las tensiones medias V medidas difirieron significativamente según la edad del árbol, mostrando los árboles jóvenes valores mucho más altos que los individuos más maduros.

4.3.2. Influencia de la altura

Para el análisis de la variación longitudinal de las señales eléctricas se han seleccionado únicamente los árboles jóvenes, ya que muestran valores significativamente más altos en las mediciones de tensión que los árboles más maduros.

4.3.2.1. Mediciones referenciadas a tierra

La figura 10 y la tabla 3 muestran los resultados obtenidos con valores muy constantes en todos los niveles de altura, con un valor máximo de tensión de $V = 0,626$ V medido a nivel del suelo y un valor mínimo de $V = 0,597$ V a 2,5 m. La corriente de cortocircuito muestra valores aún más próximos entre sí que la tensión V , con un valor máximo de $ISC = 0,568$ μ A a 0 m y un valor mínimo de $ISC = 0,519$ μ A medido a 2,5 m.

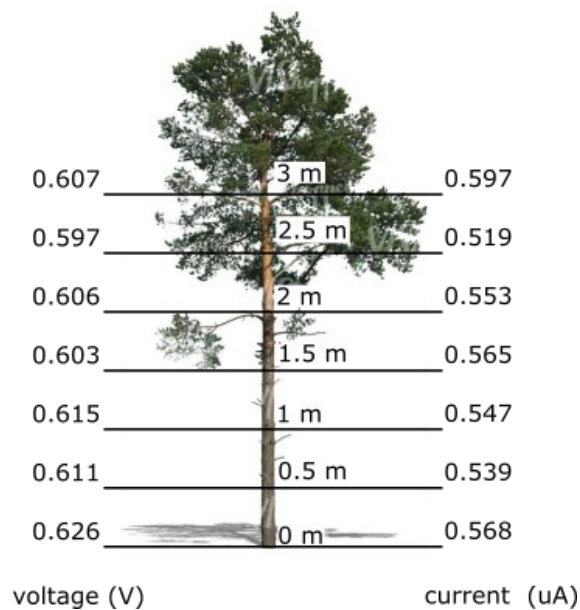


Figura 10. Mediciones referenciadas a tierra para tensión V y corriente de cortocircuito ISC considerando la altura en el árbol.

Analizando los datos obtenidos, no encontramos diferencias significativas ni en la tensión V (valor $p = 0,86$) ni en la ISC (valor $p = 0,91$) entre los distintos niveles de altura. Por lo tanto, la altura de medición no muestra ninguna influencia en la tensión ni en la ISC en las mediciones referenciadas a tierra.

Tabla 3. Media estadística y varianza de las mediciones referenciadas a tierra para la tensión V y la corriente de cortocircuito ISC considerando la altura en el árbol.

Altura (m)	Tensión (V)		ISC (μA)	
	Media	Varianza	Media	Varianza
0.0	-0.626	0.011	-0.568	0.027
0.5	-0.611	0.008	-0.539	0.038
1.0	-0.615	0.005	-0.547	0.023
1.5	-0.603	0.006	-0.565	0.023
2.0	-0.606	0.003	-0.553	0.027
2.5	-0.597	0.005	-0.519	0.022
3.0	-0.607	0.004	-0.597	0.021

4.3.2.2. Mediciones bipolares

Tanto la tensión como la *ISC* muestran valores muy próximos entre cada nivel de altura para las mediciones bipolares. Los valores más altos para la media de tensión se han obtenido entre 1 m y 1,5 m sobre el suelo ($V = 0,036$ V) y los valores mínimos a 2,5-3,0 m ($V = 0,025$ V), tal como se observa en la figura 11. Por otra parte, los valores máximos de *ISC* se han medido entre 0,0 m y 0,5 m ($0,471 \mu\text{A}$) y los mínimos a 2,0-2,5 m ($0,218 \mu\text{A}$).

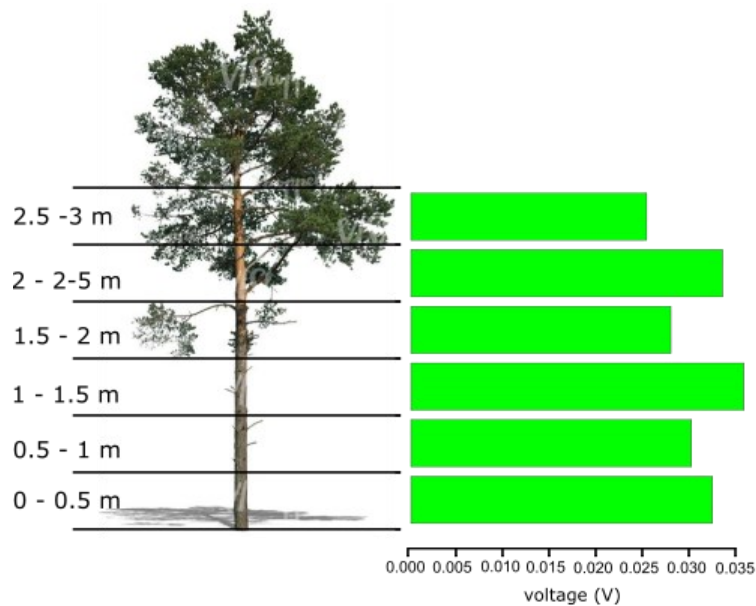


Figura 11. Mediciones de tensión *V* bipolar considerando la altura en el árbol.

No obstante, las ligeras diferencias observadas no son significativas entre los niveles de altura, ni para la tensión *V* (valor $p = 0,517$) ni para la *ISC* (valor $p = 0,248$), tal como se muestra en la tabla 4.

Tabla 4. Media estadística y varianza de las mediciones de tensión V y corriente de cortocircuito ISC bipolar considerando la altura al árbol.

Altura (m)	Tensión (V)		ISC (μ A)	
	Media	Varianza	Media	Varianza
0.0-0.5	0.032	0.001	0.471	0.164
0.5-1.0	0.030	0.001	0.427	0.062
1.0-1.5	0.036	0.001	0.441	0.068
1.5-2.0	0.028	0.000	0.263	0.091
2.0-2.5	0.033	0.001	0.218	0.060
2.5-3.0	0.025	0.001	0.332	0.269

4.3.3. Influencia de la orientación

Se observan valores muy similares y ninguna diferencia significativa entre los electrodos colocados en los diferentes puntos cardinales (valor $p = 0,871$), como puede observarse en la figura 12. Sin embargo, es necesario señalar que se detectó una pequeña diferencia significativa para la ISC entre el este y los demás puntos cardinales (valor $p = 0,048$). Por este motivo se decidió seguir obteniendo datos para analizar más detalladamente la posible influencia de la orientación en la ISC . Así, se realizaron otras tres mediciones los días 21 de abril 5 y 12 de mayo de 2018. Ninguna de ellas mostró diferencias estadísticamente significativas, ni para la tensión ni para la ISC , como puede verse en la tabla 5. En consecuencia, estas mediciones adicionales descartaron una posible influencia de la orientación sobre la tensión y la ISC .

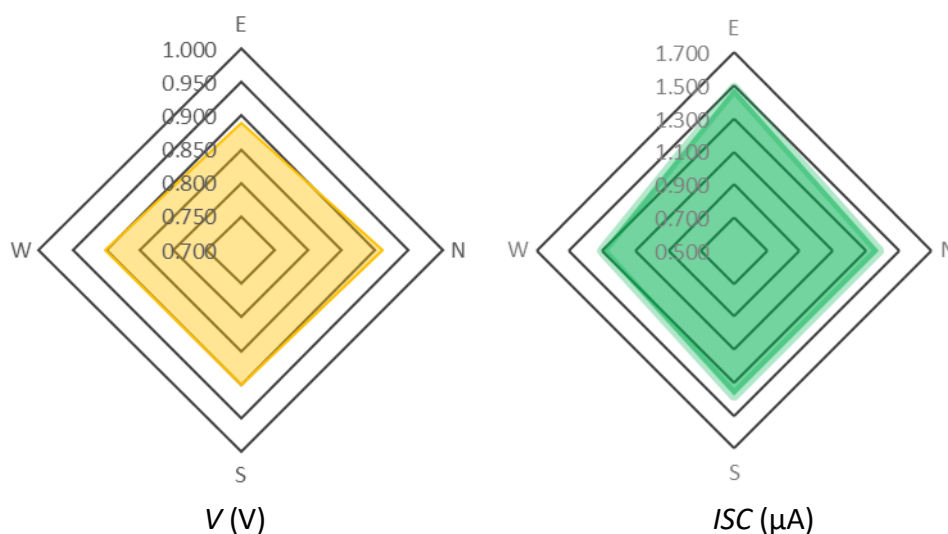


Figura 12. Valores medios de tensión V y corriente de cortocircuito ISC en función de la orientación cardinal.

Tabla 5. Media estadística y varianza de las mediciones de tensión V referenciadas a tierra considerando la orientación en el árbol.

	Tensión (V)				ISC (μA)			
	E	N	S	W	E	N	S	W
21/04/2018								
Min	-0,828	-0,864	-0,864	-0,833	-1,830	-1,540	-1,670	-1,430
Max	-1,109	-1,125	-1,109	-1,114	-5,100	-4,760	-4,660	-4,660
Media	-1,014	-1,033	-1,026	-1,025	-3,411	-3,126	-3,173	-2,860
Varianza	-0,007	-0,008	-0,007	-0,006	-0,008	-1,001	-0,874	-1,033
05/05/2018								
Min	-0,713	-0,715	-0,706	-0,703	-0,350	-0,370	-0,030	-0,370
Max	-1,017	-1,032	-0,998	-1,015	-1,470	-1,610	-1,530	-1,610
Media	-0,876	-0,900	-0,877	-0,886	-0,871	-0,876	-0,817	-0,880
Varianza	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,012	-0,011	-0,011	-0,012
12/05/2018								
Min	-0,742	-0,756	-0,747	-0,741	-0,010	0,000	-0,010	-0,010
Max	-0,841	-0,852	-0,852	-0,838	-0,310	-0,310	-0,290	-0,310
Media	-0,780	-0,802	-0,791	-0,793	-0,167	-0,141	-0,154	-0,152
Varianza	-0,012	-0,015	-0,012	-0,012	-0,132	-0,137	-0,173	-0,154

4.3.4. Configuración óptima de los electrodos

Los resultados confirman diferencias significativas (valor $p < 0,001$) en los datos obtenidos según la configuración de los electrodos, ya sean referenciados a tierra o bipolares. La figura 13 muestra gráficamente este resultado.

Los resultados obtenidos demuestran que los valores de tensión medidos muestran una clara y significativa diferencia entre las configuraciones de electrodos, con un valor medio de $V = 0,626$ V para la medida referenciada a tierra y un valor de $V = 0,036$ V para la medida bipolar. Por otra parte, los valores observados para la ISC muestran diferencias menores que para la tensión (figura 13). Así, la diferencia entre las medias es mucho menor, con una media de $0,597$ μA para la medición referenciada a tierra y de $0,471$ μA para la medición bipolar. Sin embargo, estas pequeñas diferencias sí resultan estadísticamente significativas ($p < 0,001$).

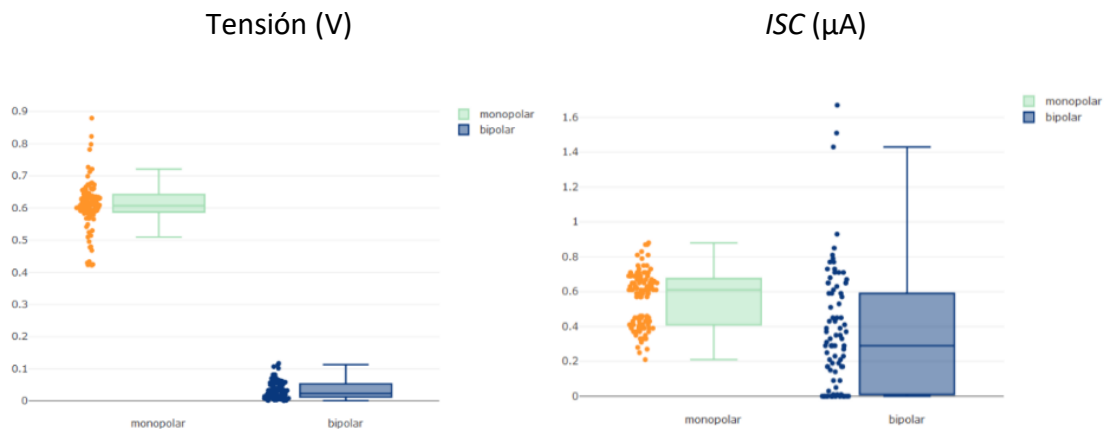


Figura 13. Diferencias significativas entre las configuraciones bipolar y referenciada a tierra en términos de tensión V (izquierda) e ISC (derecha) (valor $p < 0,0001$).

4.4. Discusión

El primer resultado a considerar es la observación de una tensión negativa del árbol con respecto al suelo. Esta observación es coherente con los diferentes autores que han estudiado la tensión en varias especies de árboles (Gibert *et al.* 2006; Gora & Yanoviak 2015; Koppán 2004; Oyarce & Gurovich 2010). En cuanto a la dirección de la corriente, Le Mouél *et al.* (2010) concluyen en la presencia de islas cargadas positivamente que producen una inversión del flujo eléctrico. Durante el trabajo de campo de esta investigación no hemos podido observar ninguna inversión del sentido de la corriente. Sin embargo, como se menciona en la sección de materiales y métodos, los diferentes conjuntos de mediciones se realizaron en condiciones meteorológicas lo más similares posible.

Además, los resultados indican que la edad de los pinos mediterráneos tiene una influencia directa en el potencial eléctrico, ya que los pinos jóvenes presentan una tensión significativamente mayor que los árboles maduros ($V = 0,92$ V y $V = 0,24$ V, respectivamente). Además de las investigaciones en laboratorio o en vivero (Gil *et al.* 2008; Gil *et al.* 2009; Oyarce & Gurovich 2010; Ríos-Rojas *et al.* 2015), existen investigaciones que se han llevado a cabo con árboles en el medio natural, pero dichas actividades se han realizado con un solo individuo. Así, por ejemplo, Cardoso *et al.* (2004) analiza las señales eléctricas de un eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con un diámetro a la altura del pecho de 45 cm. Aunque la edad del árbol fue omitida, concluimos que fueron realizados en un árbol maduro, considerando las dimensiones especificadas. Lo mismo ocurre en otros trabajos con individuos de otras especies (Gibert *et al.* 2006; Gindl *et al.* 1999; Koppán *et al.* 1999; Koppán 2004; Morat *et al.* 1994). Además, al comparar los valores de tensión obtenidos por estos autores, podemos observar que se aproximan a los obtenidos con nuestra muestra de árboles maduros. Por otro lado, los resultados obtenidos en nuestra investigación sobre la diferencia de señal eléctrica entre árboles jóvenes y maduros podrían compararse con otras investigaciones relacionadas con los cambios fisiológicos y la edad en los árboles. Así, por ejemplo, Sellin (1991) observa que el espesor de la albura, en el que se concentra la actividad fisiológica, disminuye su proporción relativa con la edad de los árboles. Asimismo, Rosenvald *et al.* (2013) demuestra que los principales parámetros funcionales para la nutrición mineral del árbol disminuyen a medida que aumenta la edad de los árboles, revirtiendo un comportamiento similar a las funciones de incremento volumétrico de *Pinus halepensis* desarrolladas y publicadas por Montero *et al.* (2001).

Además, los resultados indican que tanto las mediciones de tensión como de *ISC* muestran patrones de distribución uniformes en los fustes. Por consiguiente, la

medición no varía en función de la altura o de la orientación de la localización de los electrodos en el fuste. Le Mouel *et al.* (2010) muestran una ligera tendencia al aumento de los valores de tensión V con el aumento de la altura de inserción de los electrodos en el fuste. Sin embargo, hay que tener en cuenta que esta investigación se llevó a cabo en un único árbol. Nuestra investigación no puede verificar este presunto aumento ni en las mediciones bipolares ni en las referidas al suelo. Así, del mismo modo que hemos podido demostrar con los resultados obtenidos en nuestra investigación, Gibert *et al.* (2006) y Love *et al.* (2008) no observan diferencias significativas entre la medida de tensión a diferentes alturas de inserción del electrodo en el xilema del fuste respecto al suelo. Además, nuestros valores medios de tensión obtenidos están en el mismo orden de magnitud que los de la bibliografía consultada (Gibert *et al.* 2006; Love *et al.* 2008), a pesar de que estos autores realizaron sus trabajos en el exterior y en condiciones de laboratorio, respectivamente. Así, de acuerdo con Gibert *et al.* (2006), podemos descartar la hipótesis de la teoría electrocinética como generadora de la diferencia de potencia eléctrica en los árboles. Según la teoría electrocinética, la diferencia de potencial eléctrico sería proporcional al gradiente de presión (Delgado *et al.* 2007) que, trasladado a una planta, sería el flujo de savia por unidad de superficie. Por lo tanto, esta teoría implicaría un aumento lineal de la amplitud del potencial eléctrico con la altura en el fuste, al menos en promedio.

En el caso de la colocación de los electrodos en función de la orientación, nuestros resultados de tensión también coinciden con los obtenidos por otros autores (Love *et al.* 2008; Koppan 2004), que se obtuvieron en mediciones en árboles individuales. Los valores de ISC sólo se presentan en un trabajo (Love *et al.* 2008), los valores de ISC mostrados allí son bastante similares a nuestros valores registrados. Sin embargo, no se menciona la distribución de la ISC . Dado que la distribución de la tensión es homogénea, esperábamos lo mismo con la ISC , por lo que no tenemos argumentos en contra de la hipótesis de que la distribución de la ISC deba comportarse de forma diferente.

4.5. Conclusiones

Las conclusiones más importantes que podemos extraer de este capítulo de la tesis son las siguientes:

- La tensión eléctrica registrada, presenta una polaridad negativa en el árbol con respecto al suelo.
- La corriente de cortocircuito ISC y la tensión no varían en función de la altura de medición u orientación del lugar de inserción de los electrodos en el fuste, lo que reduce la dificultad del trabajo de campo para recoger datos, ampliando las posibilidades de instalación de equipos de medición.
- La edad de los *Pinus halepensis* tiene una influencia directa en la tensión eléctrica, ya que los pinos jóvenes presentan una tensión significativamente mayor que los árboles maduros. Además, la utilización de árboles jóvenes en las mediciones referenciadas a tierra ofrece la posibilidad de trabajar con señales eléctricas de mayor amplitud. Todo ello nos permitirá optimizar la colocación de los electrodos de medida en los árboles en función de las circunstancias. Y también nos permite consolidar el conocimiento de cómo influyen los factores estáticos en la medición de las señales eléctricas.
- En consecuencia, estos resultados nos brindan la oportunidad de seguir investigando el comportamiento dinámico de las señales eléctricas sobre una población de *Pinus halepensis* en un ecosistema mediterráneo. Todo ello con el objetivo a largo plazo de desarrollar dispositivos de bajo coste y fáciles de usar que podrían integrarse con otras tecnologías de detección y permitirían una toma de decisiones más precisa y correcta en la planificación y gestión forestal a través de la monitorización constante de los árboles.

5. CAPÍTULO 2

Variaciones estacionales de las señales electrofisiológicas de *Pinus halepensis* Mill. en bosques mediterráneos en función de las condiciones climáticas

Publicación de referencia:

Rodolfo Zapata, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga, David Fuente, Miguel A. Mateo Pla, Jorge E. Luzuriaga & Juan Carlos Moreno Esteve (2021): Seasonal variations of electrical signals of *Pinushalepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions, *Plant Signaling & Behavior* (2021) 16(10):1948744. DOI: 10.1080/15592324.2021.1948744

Ver ANEXO II

5.1. Introducción

El clima mediterráneo resulta muy riguroso para la mayoría de las especies arbóreas debido a sus largos periodos de sequía, lluvias torrenciales y temperaturas extremas en verano (Gimeno *et al.* 2009), características que facilitan la ignición y propagación de incendios forestales como principal perturbación de los ecosistemas forestales mediterráneos (Pausas & Vallejo 1999). Sin embargo, muchas plantas se han adaptado a estas condiciones y han favorecido el establecimiento de ecosistemas con una gran biodiversidad (Syphard *et al.* 2009).

En el marco actual de emergencia climática, las zonas de clima mediterráneo son vulnerables a una disminución de las precipitaciones, escenario plausible en las próximas décadas, tal y como predicen los modelos de circulación atmosférica (Gracia *et al.* 2002). Se trata de un reto global, ya estas regiones (Australia oriental, África austral, partes de Chile, California y la cuenca mediterránea) están presentes en todos los continentes y están densamente pobladas.

Según Gracia *et al.* (2002), se espera una reducción de las precipitaciones del 10% en la Península Ibérica en los próximos 50 años, así como una disminución del 25% del contenido de agua del suelo. La reducción de la reserva hídrica del suelo es consecuencia del aumento de la tasa de transpiración de los árboles durante el periodo vegetativo (Vicente *et al.* 2018) y de la mayor demanda evaporativa de la atmósfera (Gracia *et al.* 2002; Peñuelas *et al.* 2004). El estado fitosanitario de los árboles en zonas de clima mediterráneo está asociado tanto a las fluctuaciones climáticas características como a otros procesos ecológicos (Guillen-Climent *et al.* 2020), como los focos de incendio (Resco de Dios *et al.* 2007). En un contexto de cambio climático, la recurrencia de los incendios forestales se ve favorecida en términos de intensidad y frecuencia (Guillen-Climent *et al.* 2020) por la debilidad temporal de muchos árboles y arbustos (Hódar *et al.* 2012). Por lo tanto, la detección precoz de individuos y masas debilitadas, que aún no muestran síntomas visibles de enfermedad, podría representar un avance significativo en la planificación de la gestión forestal, sobre todo en su resiliencia ante afecciones bióticas (plagas) y abióticas (sobre todo incendios forestales, pero también huracanes y nevadas) (Guillen-Climent *et al.* 2020).

La medida de variables electrofisiológicas puede ayudar a la monitorización del estado de estrés a los que están sometidos los árboles en condiciones extremas y ante el riesgo de afecciones o perturbaciones. Así, Love *et al.* (2008) demostraron la existencia de un potencial eléctrico continuo entre los electrodos insertados en el floema del árbol y el suelo circundante. Además, recientemente se ha documentado que

diferentes estímulos ambientales también producen cambios en la señal eléctrica (Oyarce & Gurovich 2010). Además, según algunos autores (Datta & Palit 2004; Gibert *et al.* 2006; Gil *et al.* 2008; Gil *et al.* 2009; Gora & Yanoviak 2015; Ríos-Rojas *et al.* 2015) la variación de las señales eléctricas en respuesta al estímulo depende de la intensidad de la estimulación.

Este comportamiento ha sido estudiado por otros autores en laboratorios de investigación bajo condiciones controladas (Gil *et al.* 2008; Gil *et al.* 2009; Ríos-Rojas *et al.* 2015; Volkov & Ranatunga 2006). Esta característica de las señales eléctricas podría utilizarse como elemento de monitorización del estado de los árboles dentro de su ecosistema en condiciones naturales. A pesar de las diferentes investigaciones realizadas, todavía no está claro qué factores ambientales tienen mayor influencia sobre las variables electrofisiológicas del árbol. Algunos trabajos publicados han estudiado las señales eléctricas de los árboles en condiciones controladas y sólo para zonas climáticas continentales y centroeuropeas, por ejemplo, *Aesculus hippocastanum* (Morat *et al.* 1994) y *Populus nigra* (Gibert *et al.* 2006) ambos en Francia, *Salix alba* en Austria (Gindl *et al.* 1999), *Quercus spp.* y *Fagus sylvatica* en Hungría (Koppán *et al.* 1999; Koppán 2004). Por lo tanto, hasta donde sabemos, ninguna investigación previa que haya abordado este tema en condiciones de campo ha estudiado la respuesta eléctrica de árboles situados en ecosistemas altamente vulnerables al cambio climático como los bosques mediterráneos.

Lamb & Gray (1978) afirman que los árboles que crecen en condiciones rigurosas, como los ecosistemas mediterráneos, responden más claramente a las variaciones climáticas. En consecuencia, el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) es una especie fundamental y muy representativa para el seguimiento de los cambios ambientales, ya que está muy bien adaptado a la sequía, estando su crecimiento muy relacionado con el suministro de agua (Olivar *et al.* 2009). Además, es una especie pionera que se está expandiendo fuertemente en las dos orillas de la cuenca mediterránea (Maestre *et al.* 2003) debido a su alto potencial de regeneración natural tras perturbaciones (sobre todo incendios forestales) y también por su capacidad para colonizar rápidamente terrenos agrícolas abandonados (Chomel *et al.* 2014).

En resumen, los valores de las principales variables electrofisiológicas (corriente de cortocircuito *ISC* y tensión *V*) dependen del estado fisiológico del árbol (Castagneri *et al.* 2017; Ekberg *et al.* 1979; Mattsson 1986; Pfanz *et al.* 2002; Rathgeber *et al.* 2016; Rodríguez-Calcerrada *et al.* 2015) y, por tanto, ambos componentes de la señal eléctrica podrían ser indicadores robustos de la salud del bosque bajo diferentes condiciones ambientales y sus consecuentes vulnerabilidades: potencial de crecimiento, estrés hídrico, riesgo de incendios forestales y plagas, entre otros.

En el capítulo anterior, analizamos los factores estáticos más significativos que influyen en las poblaciones de *Pinus halepensis* (Zapata *et al.* 2020), es decir, experimentos realizados durante un corto periodo de tiempo en condiciones climáticas estables. Observamos que la edad del árbol influye significativamente en el potencial eléctrico medido, obteniéndose valores más altos en árboles jóvenes. Además, concluimos que la amplitud de las señales eléctricas no depende de la ubicación del electrodo. Ambos componentes de la señal eléctrica, diferencia de tensión e *ISC*, son constantes, independientemente de la orientación y la altura a la que se inserte el electrodo de medida en el fuste del árbol.

Partiendo de los conocimientos adquiridos, el objetivo de esta investigación es analizar la evolución temporal de la señal eléctrica de un grupo representativo de *Pinus halepensis* en bosque mediterráneo. De hecho, este es el primer estudio que investiga el comportamiento de las principales variables electrofisiológicas de una muestra representativa de árboles en condiciones naturales. El pino elegido es una especie mediterránea paradigmática que responde rápidamente a las variaciones climáticas, por lo que es un objeto de investigación representativo. En cuanto a la planificación experimental, las medidas eléctricas con mayor frecuencia de muestreo se llevaron a cabo durante un periodo de varios días, mientras que los ensayos a largo plazo se realizaron durante una campaña de más de un año de duración. Por lo tanto, el objetivo principal de este trabajo es detectar y analizar las variaciones estacionales, pero también diurnas y nocturnas, de las señales eléctricas de *Pinus halepensis* en un ecosistema mediterráneo representativo.

5.2. Material y métodos

Ambos componentes de la señal eléctrica, *ISC* y tensión se midieron en dos ensayos diferentes para la adquisición de datos: uno para periodos cortos y otro para periodos largos.

a) En el primer diseño experimental a largo plazo con el fin de evaluar la estacionalidad anual, los datos se registraron con una resolución semanal para evaluar la evolución de la señal eléctrica a lo largo del ciclo vegetativo anual.

b) En el segundo diseño experimental a corto plazo con el fin de analizar la estacionalidad diaria, los valores de la señal se obtuvieron cada minuto durante varios días completos consecutivos. De esta manera, podemos observar los cambios a corto plazo en la *ISC* y la tensión *V* a lo largo de los ciclos día-noche en diferentes etapas del ciclo vegetativo del pino.

5.2.1. Selección de especies y bosques representativos

Al igual que en el capítulo anterior (Zapata *et al.* 2020), el *Pinus halepensis* es la especie arbórea seleccionada sobre la que se ha realizado la medida de las señales eléctricas por ser una conífera representativa, nativa de la región mediterránea y presente en casi todas las regiones de ambas orillas de la cuenca mediterránea (Bogino & Bravo 2008; IFN3 2007; de Luis *et al.* 2013; Mauri *et al.* 2016; Pausas *et al.* 2004; Richter *et al.* 1991; Valbuena Perez *et al.* 2008). Además, el *Pinus halepensis* presenta claras relaciones entre el crecimiento y las variables climáticas. Por ello, es una especie fiable para estudios dendroclimatológicos (Olivar *et al.* 2009). Diferentes estudios para la Península Ibérica (AAVV 2008; Fady *et al.* 2003) sugieren que las series de crecimiento de esta especie reflejan una fuerte influencia de los factores climáticos, con una sensibilidad mayor que la observada en otras especies de *Pinus* como *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra* o *Pinus pinaster*. Por lo tanto, entender el impacto de los diferentes factores ambientales en la respuesta eléctrica de esta especie resulta de interés para la comunidad científica (Olivar *et al.* 2009).

En el capítulo anterior se comprobó que la amplitud de la señal es significativamente mayor en los árboles jóvenes que en los maduros (Zapata *et al.* 2020). Por esta razón y para facilitar la medida de la señal eléctrica, se decidió buscar un bosque que tuviera suficientes árboles jóvenes dentro de un área no afectada por perturbaciones

ambientales significativas como incendios recientes, plagas o daños debidos a fuertes nevadas. Por lo tanto, decidimos utilizar un bosque regenerado natural situado dentro del área protegida del Parque Natural de la Sierra Calderona en la Comunidad Valenciana, España, con una superficie aproximada de 20 ha. El rodal de muestra seleccionado tiene un tamaño aproximado de 0,25 hectáreas y está situado en la latitud 39° 45' 28,80" N y longitud 0° 30' 36,36" O. La edad media de los árboles es de 27 años. El DAP es de 12,10 cm y la altura media de 5,16 m. La densidad de población es de 484 árboles/ha.

5.2.2. Electrodo

Se utilizaron dos modelos de electrodos según su función, uno de acero inoxidable para el árbol y otro de platino-iridio (Pt-Ir) para tierra (Cardoso *et al.* 2004; Gibert *et al.* 2006; Hao *et al.* 2021; Volkov & Ranatunga 2006; Zapata *et al.* 2020). Insertamos el electrodo de acero inoxidable directamente a 1,5 m por encima del suelo en el fuste para que estuviera en contacto con el tejido floemático. Elegimos tornillos de acero inoxidable como electrodos porque se pueden insertar y retirar fácilmente de los árboles, causando sólo una pequeña herida. Además, los tornillos tienen una mayor superficie de contacto con respecto a los electrodos lisos debido a su rosca. El contacto con el tejido floemático se aseguró insertando los electrodos con una llave dinamométrica que nos permitió detectar el cambio de dureza del tejido y atravesar el tejido floemático. Esta última acción es fundamental, ya que las señales eléctricas se transmiten más fácilmente a lo largo de este tejido, dada su menor resistencia al flujo eléctrico, en comparación con otros tejidos vegetales del xylema (Oyarce & Gurovich 2010).

El segundo tipo de electrodo fue un electrodo de aleación de platino-iridio (Pt-Ir) recubierto de nitruro de titanio (TiN) sin polarización (Comisión Europea 1999) y se utilizó como referencia de tierra. Debido a la dureza del suelo, este electrodo se enterró 15 cm en el suelo mineral, desechando los centímetros de tierra vegetal, a una distancia mínima de 3 m del árbol.

Ambos electrodos se conectaron con el equipo de medición mediante un conector eléctrico y un cable conductor de cobre de 0,5 mm aislado con un revestimiento de plástico flexible.

5.2.3. Medidas para la evolución a largo plazo: estacionalidad anual

El diseño experimental a largo plazo se basó en los conocimientos adquiridos para frondosas individuales (Datta & Palit 2004; Gibert *et al.* 2006; Koppán *et al.* 1999) y en la experiencia previa descrita en el capítulo anterior de la tesis (Zapata *et al.* 2020). Este ensayo pretende observar la evolución de la señal eléctrica dentro del grupo de pinos seleccionados a lo largo de su ciclo vegetativo anual.

5.2.3.1. Procedimiento

Se tomaron datos de *ISC* y tensión a la misma hora solar una vez cada lunes durante 16 meses, entre el 28 de mayo de 2018 y el 30 de septiembre de 2019, comprendiendo más de un ciclo vegetativo completo. Se registraron cuatro valores (uno por cada punto cardinal) de cada componente de la señal eléctrica y para cada uno de los 15 ejemplares representativos de la población de estudio, es decir, 60 mediciones cada semana.

5.2.3.2. Equipo de medición y fuentes externas de datos

Los valores de *ISC* y tensión *V* se midieron con un multímetro UT71D UNI-T con una impedancia de entrada de 2,5 G Ω y una precisión del 0,1% \pm 2 mV (figura 14).



Figura 14. Equipo de medición.

Los datos meteorológicos de la zona fueron proporcionados por una estación meteorológica profesional instalada en $39^{\circ} 46' 10,12''$ N, $00^{\circ} 31' 14,19''$ O, localización muy próxima de la parcela de investigación. La estación meteorológica es un modelo Davis Vantage VUE propiedad de la Asociación Valenciana de Meteorología 'Josep Peinado' (AVAMET) (Asociación Valenciana de Meteorología 2020). Las variables meteorológicas a correlacionar con las componentes de la señal eléctrica son la temperatura, la humedad relativa del aire, la presión atmosférica, la velocidad del viento y la precipitación. Para simplificar, se utilizó la media diaria del día de recogida. Para la cantidad de precipitación, se asumió la precipitación semanal acumulada.

5.2.3.3. Selección de árboles

Se seleccionaron 15 árboles de una población forestal de *Pinus halepensis* siguiendo el método descrito por Hapla & Saborowski (1987) para el muestreo de árboles representativos de una masa forestal para investigaciones de parámetros anatómicos y físicos de la madera. De este modo, la selección de árboles puede considerarse como una muestra representativa del bosque circundante. Esta metodología ha sido verificada en diferentes estudios relacionados con las características morfológicas y anatómicas de los árboles y las propiedades físicas de la madera (Dix *et al.* 1992; Hapla *et al.* 2000; Oliver-Villanueva & Becker 1993; Peters 1996; Sauter 1992; Seeling 1991; Wobst 1995). La figura 15 muestra la distribución espacial de los árboles en la parcela.

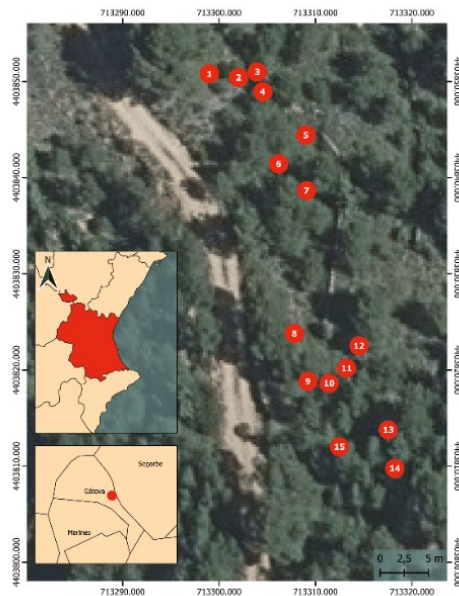


Figura 15. Distribución de los árboles seleccionados en la parcela de investigación.

5.2.3.4. Análisis estadístico

Se utilizó el coeficiente de correlación de Spearman para relacionar los datos de tensión V e ISC con las variables meteorológicas. El uso de la correlación de Spearman se basó en otros trabajos (Faraway 2016; Restrepo & González 2007) que afirman que este coeficiente es menos sensible que otros estadísticos a los valores atípicos.

5.2.4. Medidas para la evolución a corto plazo: estacionalidad diaria

Este experimento monitoriza la influencia de los ciclos día-noche sobre la señal eléctrica en un solo árbol tal y como se describe en (Cardoso *et al.* 2004; Koppán *et al.* 1999; Koppán *et al.* 2000; Le Mouél *et al.* 2010). Las medidas de ISC y tensión se prolongaron durante varios días seguidos, y las sesiones de grabación tuvieron lugar en diferentes estaciones para observar las variaciones eléctricas a lo largo del año.

5.2.4.1. Procedimiento

La tensión se registró cada segundo, mientras que la intensidad se midió durante diez segundos cada dos minutos para permitir la recuperación de la señal eléctrica. La tabla 6 muestra las fechas en las que se realizaron las sesiones de medición de 24 horas.

Tabla 6. Calendario de experimentos a corto plazo.

Campaña ID	Fechas	Días	Estación	Medida
1	26 de abril al 1 de mayo, 2019	6	Primavera	Tensión
2	29 de junio al 3 de julio, 2019	5	Verano	Tensión
3	15 de junio al 20 de junio, 2020	6	Primavera	V + ISC
4	6 de marzo al 12 de marzo, 2021	6	Invierno	V + ISC

Los experimentos realizados durante 2019 solo incluyeron medidas de tensión, mientras que la ISC y la tensión se midieron ambas a partir de 2020 (ver tabla 6).

5.2.4.2. Equipo de medición y fuentes externas de datos

La figura 16 muestra la posición del equipo para la medición de datos en el árbol seleccionado. En esta figura también se puede observar la instalación en altura sobre el fuste para proteger de la acción de la fauna la cápsula estanca que, a su vez, protege los componentes electrónicos de medida de los factores meteorológicos.



Figura 16. Emplazamiento de adquisición de datos a corto plazo en un árbol seleccionado. Visión cercana de la cápsula estanca (A). Visión general de la instalación (B).

Para la campaña de adquisición de datos a corto plazo, se desarrolló un prototipo que utiliza un dispositivo Mooshim Mooshimeter BLE-DMM-2X-01 con una precisión del 0,5% para cualquier medición de tensión. La magnitud de la intensidad se recogió midiendo la caída de V a través de un *shunt*, es decir, una carga resistiva de bajo valor a través de la cual se deriva una corriente eléctrica.

La intensidad de la señal eléctrica descendía a valores próximos a cero si el dispositivo de medición se mantenía conectado a través del *shunt*, como indica nuestra experiencia previa (ver figura 17). Para evitar el estrés del vegetal derivado del experimento, el prototipo disponía de un relé controlado con un sistema automático programable (*Pycom*). De esta forma, el circuito podía interrumpirse periódicamente, realizando las medidas de *ISC* a través del *shunt* de forma puntual y no continua.

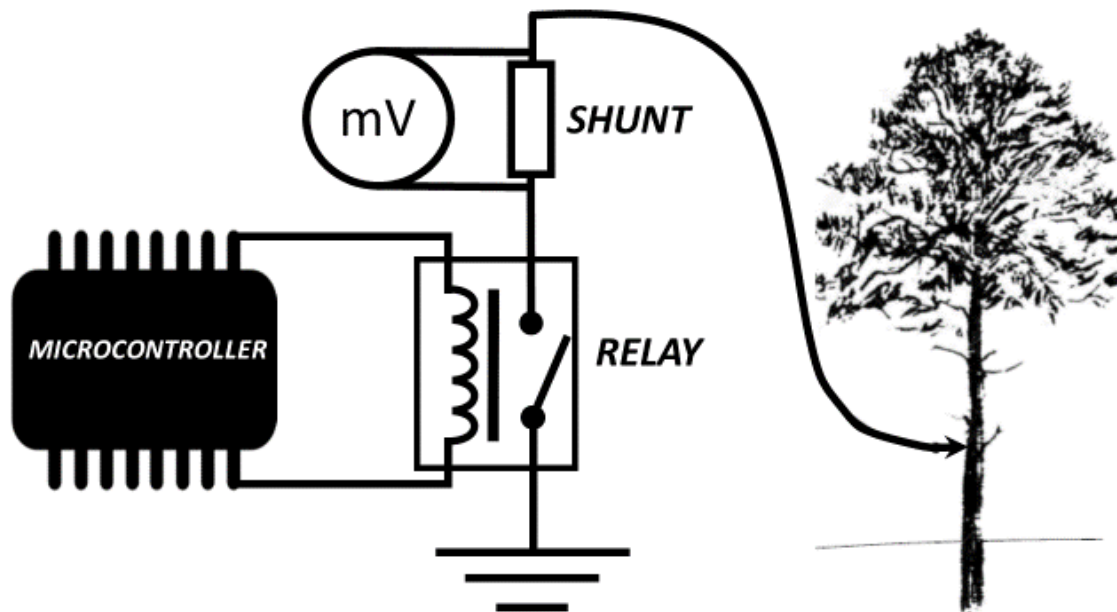


Figura 17. Diagrama del circuito de medición a través del shunt.

Las horas de salida y puesta del sol se consultaron en el Observatorio Astronómico Nacional de España [Observatorio Astronómico Nacional (2020)].

5.2.4.3. Selección del árbol

Para el seguimiento de 24 horas fue necesario trabajar con un único árbol debido a las limitaciones de disponibilidad de equipos. El árbol seleccionado (número 11) para la evaluación continua presentaba una tensión media anual que era la más cercano a la media del grupo, entre todos los ejemplares del ensayo a largo plazo.

5.3. Resultados

5.3.1. Evolución a largo plazo

Los primeros resultados obtenidos fueron los valores de tensión e *ISC* del experimento a largo plazo. La figura 18 muestra los valores medio, máximo y mínimo de la población muestreada durante la campaña de 16 meses. El valor máximo registrado para la tensión es de $V = 1,10$ V (ver figura 18a) y para la corriente de cortocircuito es de $ISC = 11,05$ μ A (ver figura 18b), mientras que las magnitudes mínimas corresponden a $V = 0,11$ V e $ISC = 0,00$ μ A, respectivamente. Se puede observar que los valores de tensión se mantienen dentro de un rango más estrecho con respecto a la *ISC*. Esto significa que las variaciones entre los especímenes son menores para la tensión que para la *ISC*. Los valores más altos se midieron en octubre y noviembre de 2018 y abril y mayo de 2019, correspondientes a las estaciones de otoño y primavera. Por el contrario, los valores mínimos se registraron en febrero, marzo de 2018 y julio y agosto de ambos años. Así, durante el invierno y el verano se registran valores mínimos, especialmente para los meses estivales. Las líneas verticales discontinuas representan las fechas en las que se tomaron las fotografías de los árboles (ver figura 18c). Una foto se tomó a finales de julio, lo que corresponde al periodo de mayor estrés hídrico para el árbol. La segunda foto corresponde a finales de abril, que es el inicio del periodo de crecimiento, es decir, cuando las temperaturas no son demasiado altas y hay suficiente disponibilidad de agua debido a las intensas lluvias de la primavera.

La figura 19 muestra los valores medios de tensión e *ISC* de todos los árboles junto con el experimento a largo plazo. En ella se observa que existe una relación característica entre ambas variables electrofisiológicas. Cabe destacar que las tensiones inferiores a $V < 0,6$ V no permiten medir ningún valor de la *ISC*. Estos registros sólo se recogen durante las estaciones de verano y en los meses más fríos del año. Por el contrario, las cifras de mayores tensiones V e *ISC* se recogen durante las dos estaciones lluviosas y con temperaturas moderadas. La relación entre ambos componentes eléctricos sigue un comportamiento exponencial. De hecho, los aumentos de tensión por encima de $V > 1,0$ V promueven subidas considerables de la *ISC*, lo que representa un fenómeno recurrente a lo largo de todo el periodo de estudio.

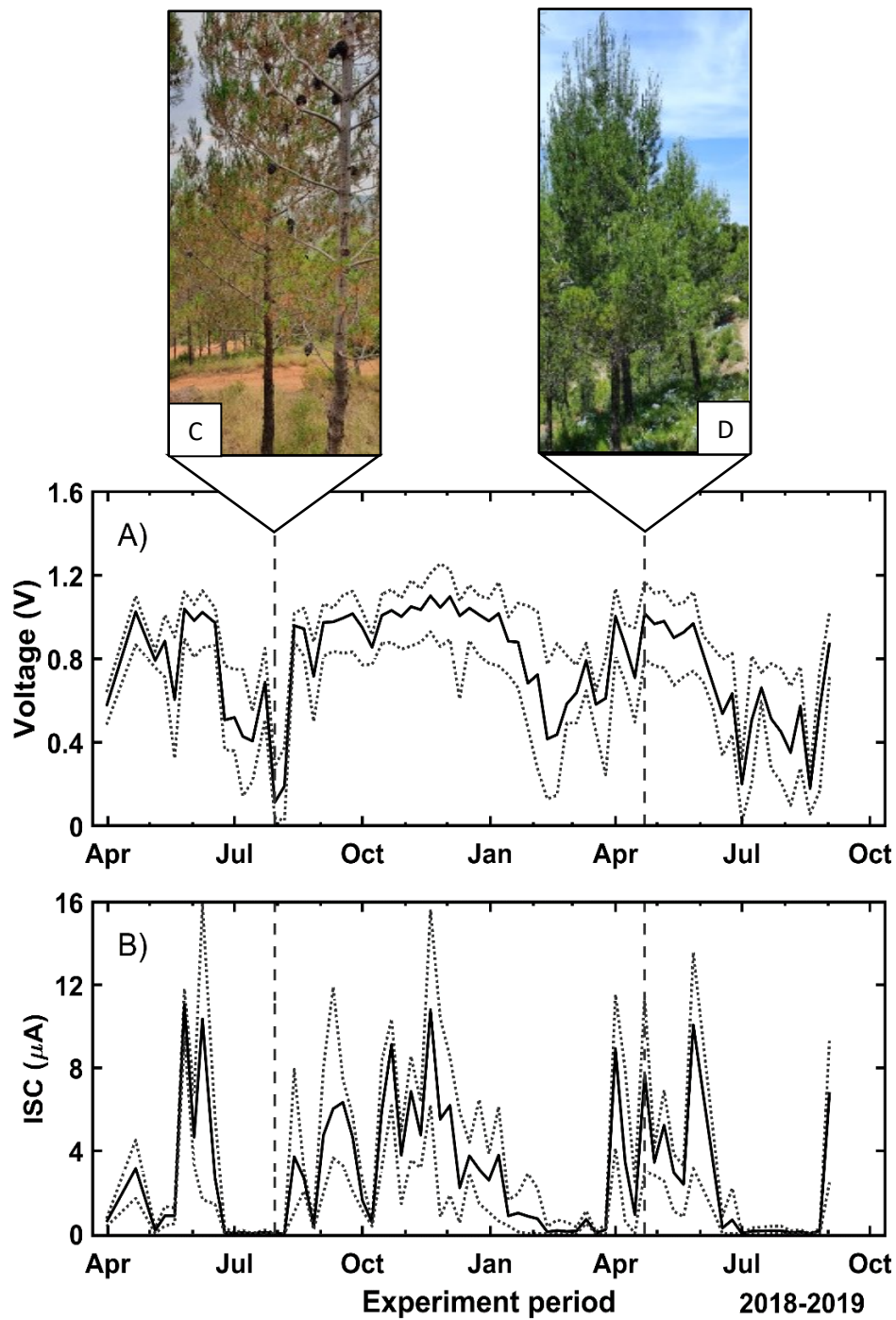


Figura 18. Evolución temporal de la tensión V (a) y la ISC (b) durante el experimento a largo plazo, expresada como valor medio de todos los árboles. También se representan los valores máximos y mínimos (punteados). Las líneas verticales discontinuas.

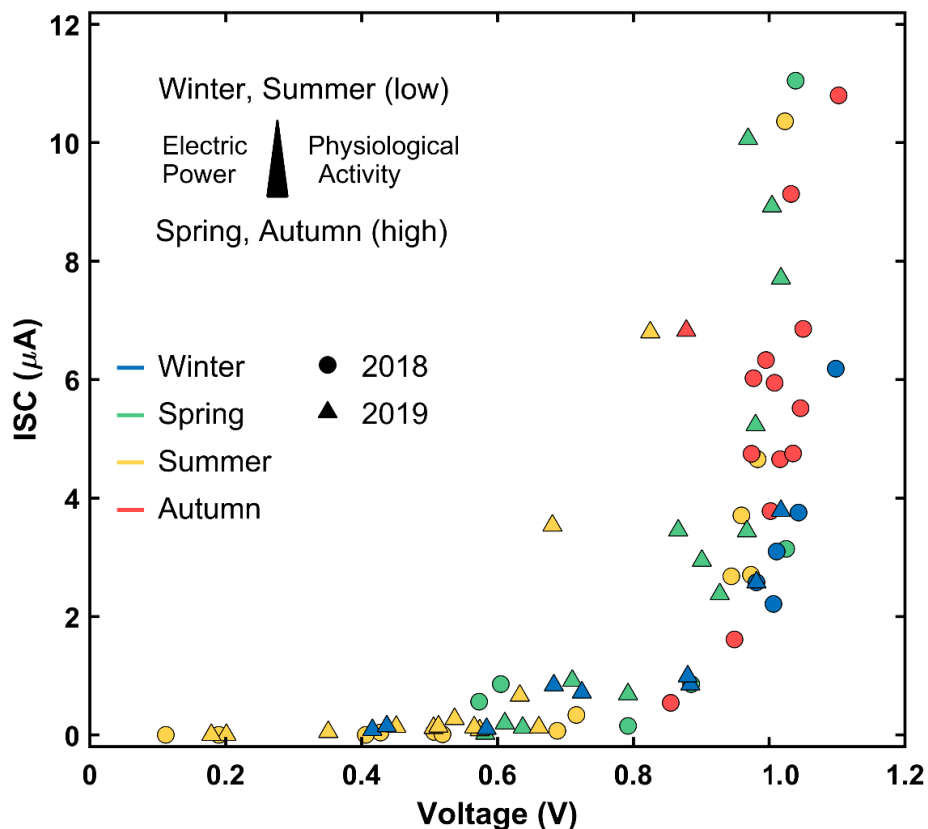


Figura 19. Relación entre la tensión media V y la corriente de cortocircuito ISC de todos los árboles para la campaña a largo plazo.

5.3.2. Relación entre la señal eléctrica y las variables atmosféricas

La figura 20 muestra los principales resultados obtenidos del análisis de correlación de Spearman. Basándose en su resultado, existe una fuerte correlación positiva entre la tensión y los valores de ISC , como se ha descrito anteriormente. Esta correlación alcanza un valor de Spearman de $R^2 = 0,838$ con $p < 0,05$. Sin embargo, no existe correlación entre la tensión, ni tampoco la ISC , y la presión atmosférica. En relación con la velocidad del viento y la humedad relativa, tampoco existe una correlación significativa de estas variables con la variable tensión, ya que los valores p calculados son $R^2 = 0,372$ y $R^2 = 0,082$, respectivamente. Análogamente, el efecto del viento sobre la ISC (efecto negativo) es estadísticamente significativo. Sin embargo, no ocurre lo mismo con el ISC y la humedad del aire. Además, la relación con la temperatura diaria sólo resultó significativa con respecto a la tensión, siendo dicha influencia negativa con $p = -0,402$. Por el contrario, no hubo correlación con significación estadística para la magnitud de la corriente de cortocircuito ISC ($p = 0,083$).



Figura 20. Resultado de la correlación de Spearman. Los valores dentro de un recuadro coloreado corresponden a una correlación estadísticamente significativa diferente de $R^2 = 0$, con un nivel de significación $\alpha = 0,05$.

El volumen de precipitación es la variable atmosférica que muestra la mayor correlación según la metodología de Spearman. Existe una correlación estadísticamente significativa tanto para la tensión como para la ISC, con una $p < 0,05$ y alcanzando un valor de $R^2 = 0,652$ para V y $R^2 = 0,709$ para ISC . Dado que la precipitación es la variable que más influye en las señales eléctricas del árbol, a continuación, representaremos la precipitación acumulada semanal junto a la evolución de la tensión y de la ISC, tal y como se muestra en la figura 21. Se puede observar que mientras la tensión parece ser menos dependiente de la precipitación, no ocurre lo mismo con los valores de ISC. Así, esta magnitud estaría correlacionada con la intensidad de la lluvia. En efecto, los aumentos de ISC se pueden medir cuando ha existido una precipitación la semana anterior. Hasta cierto punto, el aumento de la intensidad parece ser proporcional a la cantidad de lluvia en verano y otoño, mientras que en invierno no se registran lluvias durante el periodo de nuestro experimento. Sin embargo, los árboles en primavera parecen reaccionar fuertemente a la lluvia independientemente del volumen de la misma.

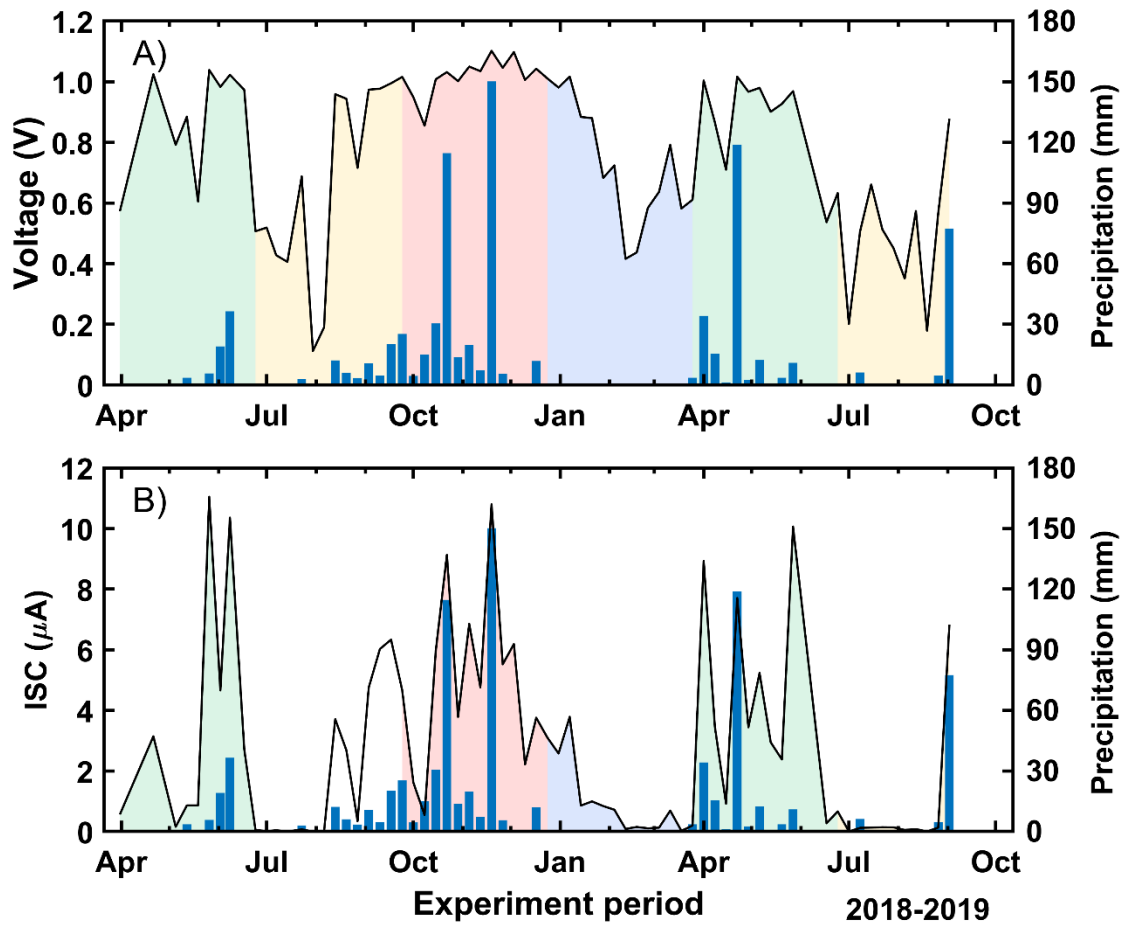


Figura 21. Evolución temporal de la tensión V (A) y de la corriente de cortocircuito ISC (B) durante el experimento a largo plazo, expresada como valor medio de todos los árboles. También se muestra la cantidad de precipitaciones. Los colores del fondo representan la estación astronómica correspondiente.

La figura 22 muestra la evolución de la temperatura y la tensión. Se observa que existe una correlación negativa entre esas magnitudes de julio a octubre, cuyo valor es $R^2 = -0,687$, mientras que la correlación se hace positiva durante el primer semestre del año con un valor de $R^2 = 0,262$.

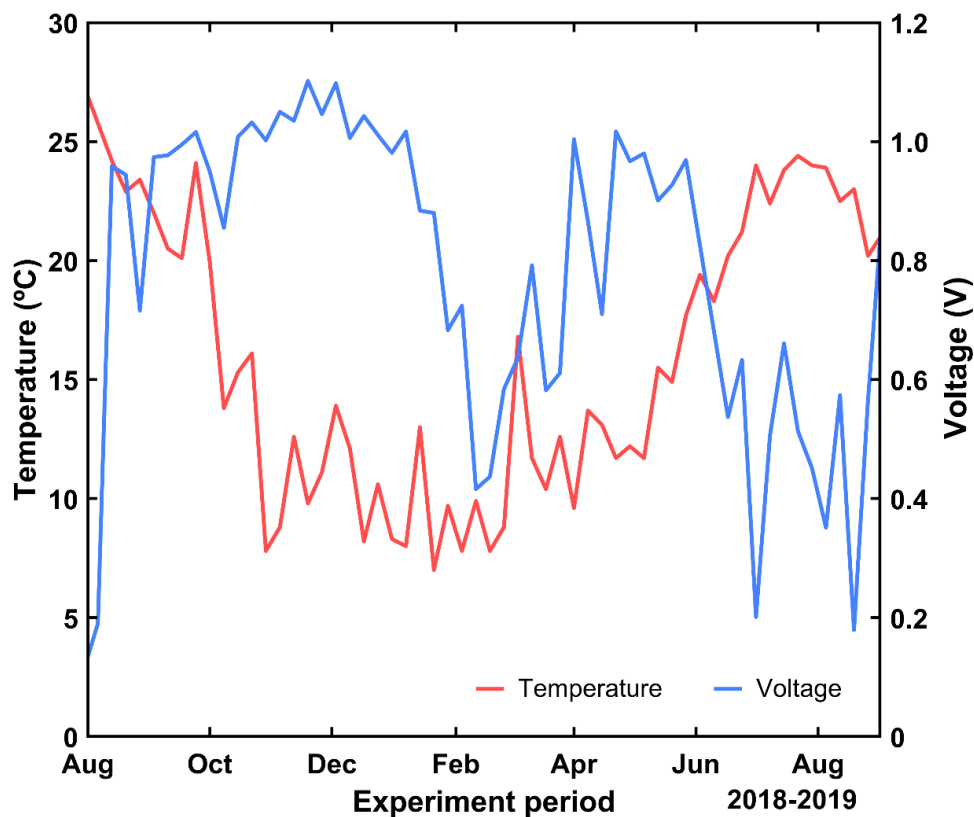


Figura 22. Evolución temporal de la temperatura y la tensión V medio de todos los árboles durante el experimento a largo plazo.

5.3.3. Evolución a corto plazo: estacionalidad diaria

Se realizaron cuatro experimentos de 24 horas durante varios días en diferentes estaciones para observar la respuesta eléctrica de los árboles a los ciclos día-noche. El gráfico de cada experimento de tensión V se muestra en la figura 23. Del mismo modo, los ensayos de ISC (sólo dos experimentos en este caso) se muestran en la figura 24.

El primer ensayo se realizó del 26 de abril al 01 de mayo de 2019, es decir, durante el periodo de crecimiento más importante de los árboles por su actividad vegetativa. La temperatura máxima fue de 20,6°C y el experimento se realizó tres días después de la última precipitación (2,6 mm) y siete días desde que se produjo la última tormenta (139,4 mm). La figura 23a muestra las variaciones diarias de tensión, que suponen $V = 0,05$ V. Además, la mayor diferencia de potencial se recoge por la noche. De hecho, la mayor diferencia se obtiene a la hora local del amanecer. La señal eléctrica disminuye gradualmente hasta alcanzar una diferencia de tensión mínima en el cenit. A partir de este momento, el V registrado comienza a aumentar hasta la puesta de sol.

La siguiente prueba se realizó del 29 de junio al 4 de julio de 2019 (ver figura 23b). Los árboles en este periodo se encuentran en una de las fases más estresantes del año debido a las altas temperaturas y la escasa disponibilidad de agua. Las mediciones se realizaron 37 días después de la última tormenta registrada, con una temperatura máxima medida por la estación meteorológica de 36,9°C. En estas condiciones de estrés hídrico, las señales siguen mostrando oscilaciones diarias de aproximadamente 0,05 V y una inversión de los periodos de la máxima y mínima tensión en comparación con el periodo primaveral. Hay una fuerte reducción de tensión en el periodo comprendido entre las 21:30 y las 10:00 del día siguiente. Posteriormente, se produce un aumento relativamente moderado entre las 10:00 h y las 14:00 h. A continuación, se alcanza un periodo de estabilidad hasta aproximadamente las 20:30 h, para terminar con un marcado descenso hasta aproximadamente las 21:30 h, cuando el ciclo vuelve a comenzar.

Otras series de mediciones se realizaron durante el periodo comprendido entre el 15 y el 20 de junio de 2020 (ver figura 23c). Transcurrieron cinco días desde el último periodo de precipitaciones, en el que se recogieron 10,6 mm en tres días de lluvia. En este periodo, la estación meteorológica registró una temperatura máxima de 26,6°C. El gráfico no muestra variaciones aparentes entre las horas nocturnas y diurnas. El 19 de junio se observa una marcada anomalía eléctrica de más de 1 V que coincide en fecha y hora con una tormenta eléctrica sin apenas lluvia medible (0,6 mm) sobre la zona arbolada. El repentino aumento de tensión desapareció pocas horas después de que se desvaneciera la tormenta. La figura 23c también muestra una clara tendencia a la baja en los valores de tensión a lo largo del periodo estudiado.

Además, entre el 6 y el 12 de marzo de 2021, la temperatura máxima registrada fue de 22,1°C, mientras que la mínima supuso 2°C. Durante este periodo de medición, se registró una precipitación global de 21,4 mm los días 7 y 8 de marzo, en este caso sin actividad eléctrica atmosférica. Este evento de lluvia coincide con un aumento repentino de la amplitud de la señal eléctrica registrada, como se muestra en la figura 23d. A diferencia del comportamiento transitorio que mostró la tensión (ver figura 23c), la señal eléctrica no vuelve al nivel previo que tenía antes de producirse la precipitación ($V = 0,4$ V). Por el contrario, tras el episodio de lluvia, se mantiene una magnitud de tensión $V = 0,6$ V durante casi dos días. Después, disminuye lentamente hasta valores próximos a $V = 0,5$ V.

Durante los dos últimos experimentos de tensión V , también se recogieron mediciones del ISC . Los resultados correspondientes se muestran en la figura 24. El experimento realizado en junio de 2020 (ver figura 24a) muestra la tendencia del ISC a lo largo del periodo estudiado. Se puede observar que su evolución se asemeja a la progresión de la tensión, incluyendo la anomalía eléctrica derivada de la tormenta. A diferencia de la evolución de la tensión, la ISC muestra valores máximos y mínimos claros,

correspondientes al mediodía y a algunas horas después de la medianoche, respectivamente. En este caso, un nivel de tensión de $V = 0,4$ V es suficiente para mantener cierta corriente. Sin embargo, su magnitud es cercana a cero. Del mismo modo, las mediciones de la ISC recogidas durante la segunda semana de marzo de 2021 (ver figura 24b) muestran la misma tendencia de tensión de esa semana: tras el episodio de lluvias, ISC y V siguen siendo mucho más elevados que antes de las precipitaciones. En concreto, el nivel de corriente de cortocircuito inicial de $ISC = 0,4$ μ A se multiplica por un factor de 10 después de la lluvia y disminuye lentamente a un ritmo de 1 μ A cada dos días aproximadamente. En este caso, no se distinguen extremos locales claros durante esta semana. Esto significa que el excedente de electricidad derivado de la lluvia intensa enmascara las oscilaciones eléctricas diarias.

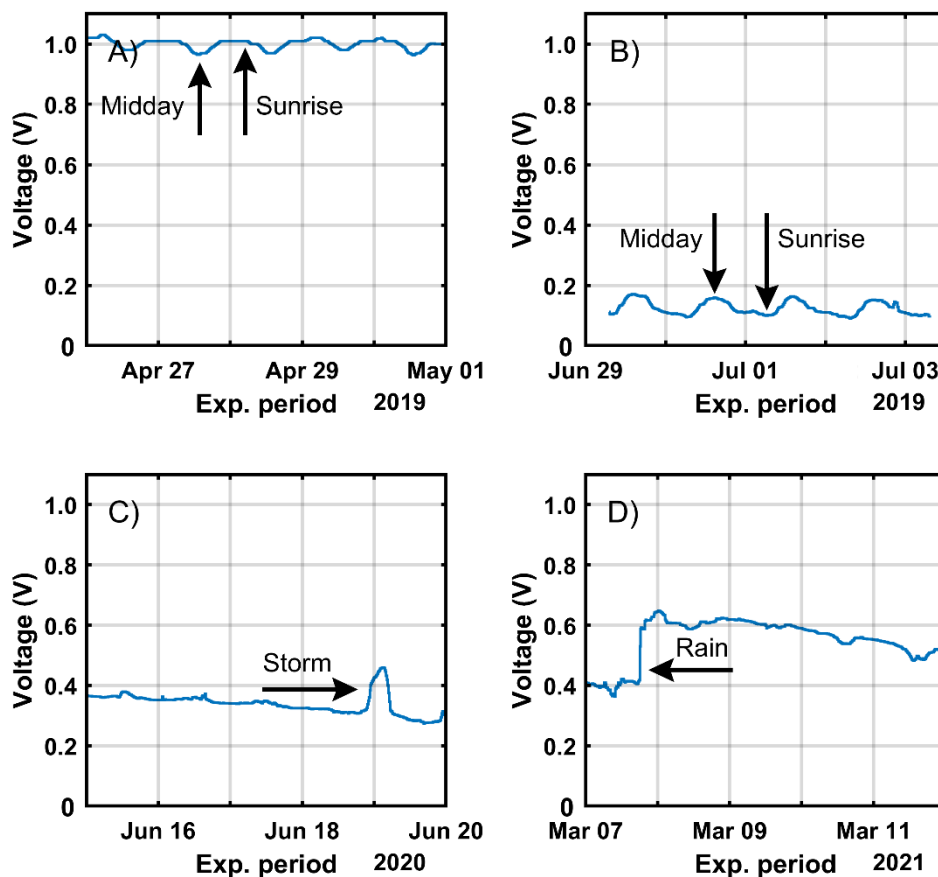


Figura 23. Evolución de la tensión V para los diferentes experimentos a corto plazo. Los eventos relacionados con cambios de tensión se indican con flechas. A) del 26 de abril al 1 de mayo de 2019. B) del 29 de junio al 4 de julio de 2019. C) del 15 al 20 de junio de 2020. D) del 6 al 12 de marzo de 2021.

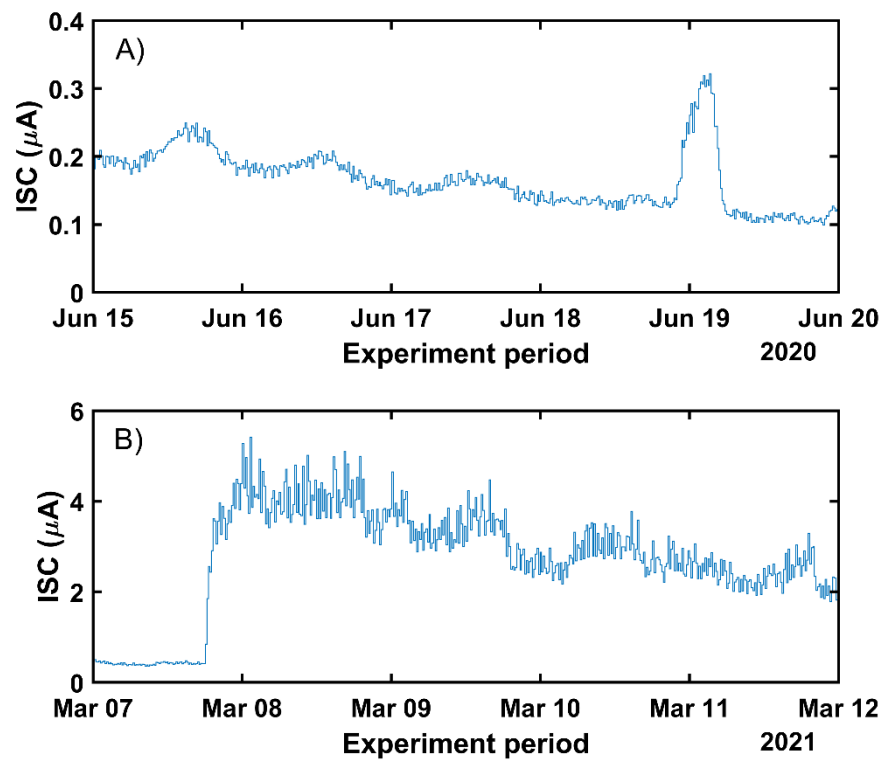


Figura 24. Evolución de la ISC durante dos experimentos diferentes a corto plazo. La evolución de la ISC (A) y (B) corresponden al experimento mostrado en (C) y (D) de la Figura 23, respectivamente.

5.4. Discusión

5.4.1. Evolución a largo plazo

La evolución a largo plazo de la tensión V y de la ISC en los árboles se ve fuertemente afectada por las características estacionales del clima mediterráneo: se recogen señales eléctricas bajas y ocasionalmente nulas durante los periodos secos, es decir, en invierno y especialmente en pleno verano como se muestra en la figura 18. En este sentido, el estrés hídrico que sufren los árboles durante estos periodos provoca una coloración amarilla y una menor densidad de acículas (Belda-Palazón *et al.* 2020), en contraste con el color verde intenso y la mayor densidad de acículas que muestran los pinos en otoño y primavera, como se muestra en las Figuras 18c y 18d, cuando ambos componentes eléctricos alcanzan sus valores máximos. Otros trabajos de investigación también informan de variaciones estacionales de la tensión en árboles bajo condiciones controladas durante largos periodos (Gibert *et al.* 2006; Koppán *et al.* 1999; Koppán *et al.* 2000). Sin embargo, los valores extremos podrían obtenerse en periodos diferentes en función de las características climáticas de cada lugar y, en consecuencia, de la adaptación de cada especie arbórea a las condiciones ambientales de su hábitat.

En esta investigación, las tensiones inferiores a $V < 0,6$ V no admiten valores de ISC medibles. Estos registros se recogen normalmente durante la estación estival y en los meses más fríos del año. Por tanto, esperamos que cuando se alcanzan estas magnitudes el árbol se encuentra en estado latente. Además, las precipitaciones parecen estar fuertemente correlacionadas con la magnitud de la ISC durante todo el año, con la única excepción de los meses de primavera. Durante este periodo, se miden valores sostenidos de la ISC , independientemente de las precipitaciones. Ciertamente, se sabe que *Pinus halepensis* presenta marcados periodos estacionales de crecimiento (Matamoros *et al.* 2008) debido al patrón climático anual, concentrando su principal actividad fisiológica en primavera cuando la disponibilidad de agua es alta y las temperaturas suben tras el invierno. Alternativamente, el *Pinus halepensis* detiene su crecimiento durante el verano y el invierno. Además, otros autores han demostrado que la falta de agua provoca la interrupción del crecimiento de las plantas en muchas especies, incluido este pino mediterráneo (Belda-Palazón *et al.* 2020). Demostramos de forma similar que la señal eléctrica, especialmente la corriente de cortocircuito ISC , muestra una reducción en los periodos en los que la disponibilidad de agua es escasa. Por lo tanto, esperamos que la magnitud de la ISC sea un buen indicador del estado fisiológico del árbol y que valores por debajo del umbral

de tensión dado correspondan a una actividad fotosintética neta nula. Así, Gil *et al.* (2009) demuestran que los valores de tensión recogidos en árboles de aguacate (*Persea americana*) bajo condiciones controladas eran dependientes de los cambios en el contenido de agua del suelo.

Además, algunos autores han identificado un efecto estacionalmente diferenciador de la temperatura sobre el crecimiento radial de *Pinus halepensis* (Matamoros *et al.* 2008), reportando una relación negativa en los meses de julio a octubre y una positiva durante el primer semestre del año. También hemos detectado esta tendencia bimodal en nuestros resultados: durante el primer semestre del año existe una correlación positiva entre la temperatura y la tensión, mientras que es negativa en el segundo semestre. Por lo tanto, considerando la dependencia crecimiento-temperatura descrita por (Matamoros *et al.* 2008), podría ser posible establecer una correlación entre el crecimiento del *Pinus halepensis* y la tensión.

Otro resultado alcanzado en esta investigación ha sido el análisis de la señal eléctrica de árboles individuales. Las mediciones individuales confirman que todos los árboles experimentan tendencias similares en cuanto a su señal eléctrica. Sin embargo, existe cierta variabilidad de la señal, especialmente en la magnitud de la ISC (ver figura 18b) y en menor medida en la tensión V (ver figura 18a), a pesar de ser todos ejemplares coetáneos y estar situados en una parcela con características edáficas similares. Del mismo modo, también se apreciaron pequeñas diferencias entre los árboles en cuanto a sus aspectos externos en respuesta a las condiciones climáticas extremas. Las disimilitudes entre los ejemplares podrían ser consecuencia de la variación edafológica (microgeología) que rodea a cada árbol. De hecho, pequeñas diferencias locales en las propiedades del suelo y del subsuelo también pueden afectar a la respuesta del árbol (Carrière *et al.* 2020). Además, otros autores mencionan que la influencia de los micrositios (Cailleret *et al.* 2014) y los atributos morfológicos de cada árbol (Cailleret *et al.* 2017) pueden conferir características únicas a cada espécimen y, por tanto, en base a esto cabría esperar una respuesta eléctrica parcialmente diferente en cada individuo.

5.4.2. Evolución a corto plazo: estacionalidad diaria

La aparición de variaciones cíclicas diarias de la respuesta eléctrica coincide con las experiencias reportadas por otros autores (Cardoso *et al.* 2004; Koppán *et al.* 2000). La figura 23a muestra las oscilaciones de tensión V , cuyo valor medio se aproxima a $V \approx 1$ V. La amplitud de la señal, es decir, la diferencia de valor máximo y mínimo se sitúa en torno a los ± 30 mV. Esta cifra es muy cercana a la publicada por Koppán *et al.* (2000), que midieron las variaciones diarias de tensión en *Quercus cerris* durante la misma

semana del año y también reportaron valores máximos durante la noche y mínimos durante el mediodía. Alternativamente, las variaciones diarias durante el verano muestran una inversión (ver figura 23b) con respecto al momento de aparición de los extremos en primavera (ver figura 23a): los valores mínimos de tensión se recogen por la noche y las medidas más altas se obtienen durante el día en el periodo cálido.

Durante dos de nuestros ensayos a corto plazo se registraron dos anomalías eléctricas originadas por una tormenta eléctrica y una lluvia puntual. En el primer caso, se detectó un aumento repentino y transitorio de la tensión y de la *ISC* (ver figura 23c y figura 24a). Por el contrario, en el segundo caso se registró un aumento de la señal que duró más que la inestabilidad atmosférica (ver figura 23d y figura 24b), probablemente debido a una mayor disponibilidad de agua en el suelo. Por tanto, los eventos atmosféricos también pueden alterar ambas magnitudes eléctricas y deben tenerse en cuenta al analizar las características a corto plazo de las señales eléctricas en los pinos mediterráneos. Además, las medidas de *ISC* describen el mismo comportamiento que en el caso de la tensión tras la aparición de los fenómenos eléctricos mencionados, tal y como se muestra en la figura 24a y en la figura 24b. Koppán *et al.* (2000) observaron alteraciones eléctricas similares, ya que los máximos de tensión en *Fagus sylvatica* se potencian cuando hay presencia de electricidad atmosférica. Además, se observó que las precipitaciones afectan al resultado eléctrico durante varios días, como ocurre en nuestra investigación. Además, Le Mouël *et al.* (2010) han observado la inversión del flujo de corriente en los árboles debido a la presencia de islas atmosféricas cargadas positivamente. Sin embargo, no pudimos reconocer tal fenómeno en ninguna de nuestras mediciones.

5.5. Conclusiones

Las conclusiones más importantes que podemos extraer de este capítulo de la tesis son las siguientes:

- Se ha podido identificar la existencia de patrones estacionales y diarios tanto en la corriente de cortocircuito *ISC* como en la tensión *V* de los *Pinus halepensis* en ecosistemas naturales.
- Una tensión mínima de $V = 0,6$ V es necesaria para registrar una corriente de cortocircuito *ISC* medible; valores que se dan durante los periodos más exigentes del año, es decir, cuando los pinos tienen una actividad fotosintética muy baja.
- Se ha encontrado una clara correlación entre las precipitaciones caídas sobre la zona y las variaciones en la señal electrofisiológica de los árboles, mostrando que los periodos sin lluvia están claramente correlacionados con tensiones *V* bajas y medidas de *ISC* nulas.
- Se ha observado una tendencia bimodal de la tensión a lo largo del ciclo anual mostrando una correlación entre el crecimiento del *Pinus halepensis* y la tensión.
- Las variables electrofisiológicas medidas parecen ser potenciales estimadores de la salud y actividad del árbol y, en consecuencia, el riesgo de afecciones bióticas (plagas) o abióticas (sobre todo incendios forestales). Así, las señales electrofisiológicas de los árboles podrían utilizarse como indicadores del estado fisiológico del árbol y, por tanto, aprovecharse para la monitorización *in situ* y permanente de los bosques mediterráneos en el actual escenario de cambio climático en aplicaciones futuras como el riesgo de incendios forestales o la vigilancia y detección de plagas

6. CAPÍTULO 3

Respuestas electrofisiológicas de *Pinus halepensis* mill. como indicador de riesgo de incendios forestales en bosques mediterráneos complementando la humedad del combustible vivo

Publicación de referencia:

Rodolfo Zapata, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga, Miguel A. Mateo Pla, & Jorge E. Luzuriaga (2022): Electrical responses of *Pinus halepensis* Mill. as an indicator of wildfire risk in Mediterranean forests by complementing live fuel moisture. *Forests* 13:1189. DOI: 10.3390/f13081189

Ver ANEXO III

6.1. Introducción

Los incendios forestales han estado presentes en las regiones climáticas mediterráneas de todo el mundo como un fenómeno natural mucho antes de que existiera la actividad humana (Bodí *et al.* 2013; Naveh 1975). Los incendios forestales son una poderosa fuerza ecológica y evolutiva que regula los rasgos de los organismos, el tamaño de las poblaciones, las interacciones entre especies, la composición de las comunidades, el ciclo del carbono y los nutrientes y las funciones de los ecosistemas (McLauchlan *et al.* 2020; Pausas & Keeley 2009). Los climas mediterráneos se caracterizan por una estación de sequía, pero su duración y severidad pueden variar mucho de una región a otra (Hoerling *et al.* 2012). Los ecosistemas de tipo mediterráneo (ETM), con su régimen climático único (Rundel 1998), favorecen el crecimiento de los árboles durante las lluvias de primavera y otoño, mientras que la larga sequía estival junto con las elevadas temperaturas produce una fuerte desecación de la biomasa (Kelly & Goulden 2016), creando condiciones altamente inflamables (Montenegro *et al.* 2004). Además, los ETM son puntos calientes de biodiversidad situados entre los climas templados mésicos y los semidesiertos y desiertos, fuertemente afectados por la emergencia climática (Ramírez-Valiente *et al.* 2022).

En todas estas regiones, los incendios forestales suponen una importante perturbación para los ecosistemas naturales, con importantes pérdidas económicas y ecológicas (McLauchlan *et al.* 2020; Vasilakos *et al.* 2007). Por ello, la evaluación del riesgo de incendio se convierte en un componente crítico de la gestión del territorio, ya que resulta muy ventajoso anticipar la probabilidad y magnitud de un incendio forestal (Vasilakos *et al.* 2007). McLauchlan *et al.* (2020) describieron la diversidad de formas en las que opera el fuego como un proceso ecológico y evolutivo fundamental e identificaron tres retos de investigación emergentes: la necesidad de estudiar el fuego a través de escalas temporales, de evaluar los mecanismos subyacentes a una variedad de retroalimentaciones ecológicas que implican al fuego y de mejorar la representación del fuego en una serie de contextos de modelización. En este contexto, la relación entre las condiciones meteorológicas extremas y la humedad del combustible vivo es un tema de investigación clave en el complejo campo de la investigación sobre la ecología del fuego (Boer *et al.* 2017; Capps *et al.* 2021; Castro *et al.* 2003; Dennison & Moritz 2009; Dahanayake & Chow 2018; Dimitrakopoulos & Bemmerzouk 2003; Holden & Jolly 2011; Nolan *et al.* 2016; Pellizzaro *et al.* 2007; Pivovarov *et al.* 2019; Ruffault *et al.* 2018), siempre apoyado por el desarrollo de tecnologías innovadoras, especialmente la teledetección (Chou & Suarez 1999; Chuvieco *et al.* 2004; Danson & Bowyer. 2004; Jurdao *et al.* 2012; Myoung *et al.* 2018; Peterson *et al.* 2008; Qi *et al.* 2012; Rao *et al.* 2020; Yebra *et al.* 2013; Yebra *et al.*

2018) y el aprendizaje automático (Jain *et al.* 2020; McCandless *et al.* 2020; Michael *et al.* 2021).

Las administraciones forestales y las agencias y servicios de extinción de incendios se enfrentan a menudo a la tarea de establecer una gestión proactiva de los incendios en función de la vulnerabilidad y el riesgo en los diferentes ETM (Corona *et al.* 2015; Schultz *et al.* 2019). Muchos de los sistemas de previsión se basan, principalmente, en los datos meteorológicos que recogen las estaciones meteorológicas (Dimitrakopoulos *et al.* 2011), como el *Canadian Forest Fire Weather Index System (FWI)*, de uso generalizado en todo el mundo (Wang *et al.* 2017). No obstante, el riesgo de incendio es la suma de otros factores múltiples (Ye *et al.* 2017), que hacen referencia a la probabilidad de ignición de un incendio (Dimitrakopoulos *et al.* 2011). A nivel mundial, existe una estrecha relación entre los incendios forestales y las actividades antropogénicas, es decir, los incendios forestales entendidos como sucesos humanos debidos a negligencias (por ejemplo, escapes de quemas agrícolas), y acciones deliberadas (por ejemplo, piromanía, venganza, intentos de cambio de uso del suelo) (Chas-Amil *et al.* 2012). Sin embargo, los incendios son también cada vez más frecuentes por causas naturales (Romps *et al.* 2014), especialmente en grandes territorios forestales abandonados o no gestionados (Almodóvar *et al.* 2022; Krause *et al.* 2014).

En el comportamiento de un incendio forestal extremo intervienen tres grandes factores con sus respectivas variables: la meteorología (régimen de vientos, temperatura y humedad relativa), la topografía (configuración del terreno en cuanto a pendiente, accesibilidad y estructura vegetal) y el estado del combustible forestal (características de humedad e inflamabilidad) (Quilez & Merida 2015). Todos los factores están estrechamente relacionados e influyen conjuntamente en la vulnerabilidad del combustible forestal a la ignición. Además, varios autores señalan también los mecanismos a través de los cuales las plantas dan respuesta a la sequía y, en consecuencia, a la inflamabilidad de la biomasa forestal, específicamente la humedad del combustible vivo (LFMC), señalando a su vez las reacciones fisiológicas al estrés hídrico en el ecosistema (contenido de agua del suelo y rasgos de la planta, incluyendo patrones de enraizamiento y rasgos de la hoja como el punto de pérdida de turgencia, potencial osmótico, flujo de savia, elasticidad y relación de masa foliar de combustibles muertos y vivos, etc.) (Karavani *et al.* 2018; Nolan *et al.* 2020).

De hecho, las relaciones entre la sequía y los incendios forestales están bien documentadas para los ETM, especialmente en Europa (Pellizzaro *et al.* 2007; Turco *et al.* 2014), Australia (Boer *et al.* 2020; Sharples *et al.* 2021) y Norteamérica (Littell *et al.* 2016), con un claro aumento de la incidencia y la superficie de los incendios forestales en situación de sequía (Pausas *et al.* 2004; Varol *et al.* 2017). También hay pruebas de que la sequía interactúa con otros controles (regímenes de viento, topografía,

actividades de gestión forestal) para afectar a la intensidad, severidad, extensión y frecuencia de los incendios (Littell *et al.* 2016; Quílez *et al.* 2020). Debido a que la sequía influye directamente en la sequedad de la vegetación en árboles y arbustos (Ruffault *et al.* 2018), la LFMC ha sido identificada como un factor clave de importancia en la combustibilidad de la biomasa (Thornthwaite 1948; Nesterov 1949; Käse 1969; Reinhard *et al.* 2005; Sancho & Quílez 2007). En este contexto, debe considerarse que la gran diversidad vegetal que caracteriza a los ETM está asociada al éxito de las especies coexistentes para evitar la competencia por los recursos del suelo (agua y nutrientes) mediante la explotación diferencial en el espacio (capas del suelo) y el tiempo de luz (anual y diaria) (Sardans & Peñuelas 2013). Así, el LFMC está influenciado por variables meteorológicas y edáficas, pero principalmente por la especie vegetal, su estado fenológico y su comportamiento hidráulico (Sancho & Quílez 2007). Por tanto, dada esta influencia, se considera necesario ampliar el conocimiento sobre el estado fenológico de las diferentes especies presentes en el ecosistema, conocer su magnitud y su variación estacional, para entender y predecir el comportamiento del fuego (Sancho & Quílez 2007), probando varias tecnologías innovadoras de sensórica, tanto terrestre (Wilson *et al.* 2021; Zapata *et al.* 2021) como remota (Gale *et al.* 2021).

Rothermel (1983) propuso una clasificación del LFMC basada en el estado de desarrollo de la vegetación. Sin embargo, los datos obtenidos en estudios realizados en algunas ETM difieren de esta clasificación (Castro *et al.* 2006; Pellizzaro *et al.* 2007; Viegas *et al.* 2013), ya que encuentran un comportamiento diferenciado del LFMC según cada especie y fuertemente dependiente de la estacionalidad (Chuvienco *et al.* 2004; Schroeder y Buck 1970). Varios autores han estudiado el estado fenológico de la vegetación midiendo directamente el LFMC mediante la toma de muestras físicas en campo (Countryman 1979; Sancho & Quílez 2007). A través de estos trabajos, se ha podido relacionar el estado fenológico de las plantas con el LFMC, al menos en una gran parte de las especies que habitan las ETM (Sancho & Quílez 2007). Sin embargo, para una de las especies arbóreas más importantes de la cuenca mediterránea, como es *Pinus halepensis* (AAVV 2008; Fady *et al.* 2003; IFN3 2007; de Luis *et al.* 2013; Mauri *et al.* 2016; Pausas *et al.* 2004), los resultados sobre la variación de la humedad estacional no fueron concluyentes (Sancho & Quílez 2007). Ya que el *Pinus halepensis* apenas muestra variación en el contenido de humedad a lo largo del ciclo vegetativo, tampoco muestra variaciones de humedad ante episodios extremos de calor y sequía que se registran habitualmente en el área mediterránea de Europa Occidental (Sancho & Quílez 2007).

Además, para una mejor comprensión del estado fenológico de las plantas en ETM en dependencia de condiciones severas de sequía, se han analizado diferentes rasgos hidráulicos de las plantas, como la medida del flujo de savia, la cual se propuso para la evaluación de las tasas de transpiración (Smith & Allen 1996). Sin embargo, algunos

autores afirman que las mediciones del flujo de savia sólo proporcionan información sobre el movimiento del agua dentro de las plantas y no están directamente relacionadas con las respuestas rápidas al medio ambiente o al estrés climático (Park *et al.* 2018). Otros autores han analizado otros rasgos hidráulicos de las plantas, como el contenido de humedad saturada, la rigidez de la pared celular o el punto de pérdida de turgencia, el potencial de solutos celulares, la fracción de agua simplástica y la capacitancia tisular (Scarff *et al.* 2021).

Además, algunos autores han propuesto la medida del potencial eléctrico como un método válido para evaluar el estado fenológico y las respuestas al estrés de árboles y arbustos (Hao *et al.* 2021). La existencia de un potencial eléctrico continuo entre los electrodos insertados en el floema del árbol y el suelo circundante fue descubierta y descrita hace muchos años (Burdon-Sanderson 1873; Darwin 1875; Love *et al.* 2008; Wright & Fisher 1981). Este potencial eléctrico está asociado a efectos electroquímicos que incluyen potenciales de difusión de membrana y transporte activo de iones (Gibert *et al.* 2006). Además, trabajos más recientes han documentado que algunos estímulos ambientales también producen cambios en las señales eléctricas de los árboles (Oyarce & Gurovich 2010). Más específicamente en *Pinus halepensis*, en el segundo capítulo de esta tesis se ha podido demostrar una alta correlación entre variables meteorológicas y variaciones en las señales eléctricas (Zapata *et al.* 2021). Según algunos autores (Gil *et al.* 2008; Gil *et al.* 2009; Ríos-Rojas *et al.* 2015), las propiedades eléctricas (como reacción fisiológica de la planta) parecen estar relacionadas con respuestas rápidas al estrés hídrico. Desafortunadamente, estas respuestas a veces no son evidentes o no producen indicadores visuales consistentes, como el marchitamiento y los cambios en el color de las hojas (Fromm & Lautner 2007).

Considerando estas características de la señal eléctrica medida en árboles, la creciente importancia de *Pinus halepensis* en los bosques mediterráneos europeos (AAVV 2008; Fady *et al.* 2003; IFN3. 2007; de Luis *et al.* 2013; Mauri *et al.* 2016; Pausas *et al.* 2004; Sancho & Moraga 2007), y la dificultad de conocer el estado fenológico de esta especie (Sancho & Quílez 2007), el objetivo de la investigación en este capítulo de la tesis ha sido evaluar preliminarmente la posibilidad de implementar las respuestas de las señales eléctricas de *Pinus halepensis* como un indicador para complementar la evaluación del LFMC, como un método para monitorizar el estado fenológico y el nivel de estrés por sequía. Finalmente, la investigación pretende analizar la relación entre los resultados obtenidos para las señales eléctricas y el índice de riesgo de incendio forestal, normalmente utilizado por las agencias de lucha contra incendios, con el fin último de sentar las bases para el desarrollo tecnológico de sensores inalámbricos para el monitorio de las variables electrofisiológicas en nuestros bosques.

6.2. Materiales y métodos

6.2.1. Diseño de la investigación

El objetivo principal de este capítulo de la tesis es estudiar la relación entre las señales eléctricas como resultado del estado fenológico de *Pinus halepensis*, el LFMC y el riesgo de incendio forestal. Por lo tanto, los principales parámetros a medir serán los componentes de la señal eléctrica: corriente eléctrica máxima, a través de la medición de la corriente de cortocircuito *ISC*, y la tensión *V*, junto con medidas del LFMC, así como también con las principales condiciones meteorológicas (temperatura, humedad relativa y precipitación) y el índice de riesgo de incendio forestal medido, evaluado y publicado por las agencias meteorológicas o de emergencia locales.

Para ello, la investigación se ha dividido en dos fases:

1. En una primera fase, las mediciones se realizaron durante la temporada principal de incendios forestales (24 semanas en los meses más cálidos y secos, desde finales de primavera hasta principios de otoño) en una zona representativa de la cuenca mediterránea.
2. Los resultados de esta primera fase se completaron con un segundo estudio, en el que se analizaron retrospectivamente los valores de las señales eléctricas recogidas en los tres años anteriores.

6.2.2. Selección de la muestra

Pinus halepensis Mill. (pino carrasco) y *Pinus brutia* Ten. (pino turco o calabrés) son dos especies arbóreas sistemáticamente próximas que dominan las ETM de la cuenca mediterránea europea (Danson & Bowyer 2004) y que pueden hibridarse de forma natural allí donde coexisten (Korol *et al.* 1995). Así, ambas son especies de coníferas autóctonas tolerantes a la sequía y de rápido crecimiento (Danson & Bowyer 2004), bien adaptadas a las condiciones secas del verano (Fady *et al.* 2003). *Pinus halepensis* cubre ampliamente la parte occidental de la cuenca mediterránea, mientras que *Pinus brutia* se localiza principalmente en la parte oriental, ambas principalmente en zonas costeras (Allard *et al.* 2013). Se encuentran entre las especies más afectadas por los

incendios forestales en Europa (Buhk *et al.* 2007), aunque son árboles resistentes al fuego debido a la alta producción de conos seróticos (piñas) que favorecen una rápida regeneración post-incendio (de las Heras *et al.* 2012). Estas especies han sido ampliamente plantadas entre 1930 y 1980 en zonas mediterráneas para la protección del suelo y cortavientos cerca de las costas (Moreira *et al.* 2011). En concreto, el *Pinus halepensis* es el pino más ampliamente distribuido y abundante en los ETM, cubriendo cerca de 7 millones de ha en esta región (Farjon 2010), estando presente en todas las regiones de ambas orillas del Mar Mediterráneo y extendiéndose desde el Mediterráneo Occidental (España, Marruecos), donde es más abundante, hasta el Líbano pasando por el Sur de Francia, Italia, Grecia y Turquía en el Sur de Europa y Argelia, Túnez, Libia en el Norte de África. Los modelos de envolvente bioclimática predicen que la zona climática adecuada de *Pinus halepensis* está claramente en expansión (Rathgeber *et al.* 2000; Thuiller 2003; Urli *et al.* 2014). Por ello, hemos seleccionado el *Pinus halepensis* por su creciente importancia y representatividad en los ETM (Osem *et al.* 2011). De hecho, es la especie arbórea más influyente en la disponibilidad total de biocombustible en los bosques mediterráneos (Sancho & Quílez 2007). Además, Sancho & Quílez (2007) describen que el *Pinus halepensis* no muestra fuertes variaciones en su LFMC frente a variaciones estacionales, por lo que posibles variaciones de las respuestas eléctricas podrían añadir más conocimiento sobre el estado fenológico de los árboles en dependencia de condiciones severas de sequía, permitiendo la integración de estas variables en la gestión preventiva de incendios forestales.

Al igual que en los capítulos anteriores de esta tesis (Zapata *et al.* 2021; Zapata *et al.* 2020), decidimos utilizar como área de estudio un bosque joven representativo compuesto en un 93% por *Pinus halepensis* procedente de una regeneración natural post-incendio, situado dentro del espacio protegido del Parque Natural de la Sierra Calderona en Gátova, Valencia (España). La masa seleccionada se encuentra a 39°45'28.80" de latitud norte y 0°30'36.36" de longitud oeste. La masa forestal tiene una densidad de población de 484 árboles/ha, con un DAP medio de 12,10 cm, una altura de los árboles de 5,16 m y una edad de 27 años (ver figura 25).



Figura 25. Vista de la parcela de estudio (agosto de 2021).

Este rodal de muestra se seleccionó por tratarse de un bosque de edad uniforme con suficientes árboles homogéneos, dentro de un área no afectada por perturbaciones naturales significativas, como incendios forestales recientes, plagas o daños debidos a huracanes o fuertes nevadas. Se buscó que el rodal tuviera estas condiciones de uniformidad (regeneración natural tras un incendio forestal previo ocurrido en verano del año 1994), para reducir las diferencias entre los individuos que forman parte del estudio, ya que, como hemos visto en el primer capítulo de esta tesis, la edad es un factor influyente en la amplitud de la señal eléctrica (Zapata *et al.* 2020). El rodal seleccionado reúne todas las características anteriormente descritas, con unas condiciones de emplazamiento (suelo y agua, orientación y pendiente) constantes.

Se realizó un análisis del suelo basado en perfiles edáficos para obtener las principales variables edáficas que pueden influir en el comportamiento eléctrico de los árboles de la muestra (Tabla 7).

Tabla 7. Propiedades del suelo en la parcela de estudio.

Textura (%)			Clasificación USDA	Wp [%]	Capacidad de campo [%]	Espacio poroso [%]	Profundidad [cm]
Arena	Limo	Arcilla					
20.1	43.6	12.3	Marga				
Factor de humedad	Ph	Conductividad eléctrica [ds/cm]					
0.92	8.2	1.869	3.7	11.8	45.66	30	

6.2.3. Selección de árboles muestra

La primera fase de este estudio se realizó sobre un total de 240 árboles, seleccionados siguiendo el método descrito por Hapla & Saborowski (1987) y utilizado por otros autores (Hapla *et al.* 2000; Oliver-Villanueva & Becker 1993) para el muestreo de árboles representativos de una masa forestal para el análisis de las características morfológicas y anatómicas del árbol y físicas de la madera.

Aunque el proceso de medición eléctrica no es destructivo (véase el apartado 6.2.4.1 (a)), la obtención del contenido de humedad (véase el apartado 6.2.4.1 (b)) requiere cortar material vegetal (ramas vivas) de los árboles en pie en diferentes momentos de la prueba. Obviamente, esto no es posible sin herir gravemente a los árboles. Para evitar este impacto, el conjunto total de 240 árboles se ha subdividido en 24 grupos, es decir, un grupo de 10 árboles por cada semana de evaluación. Cada grupo de muestra semanal estaba formado por los 10 árboles más cercanos al electrodo de tierra colocado en el centro.

En la segunda fase de este trabajo, se midieron los valores de la señal eléctrica obtenidos en los capítulos anteriores de la tesis (Zapata *et al.* 2021; Zapata *et al.* 2020) en 15 árboles representativos del mismo rodal durante tres años. Estos árboles también se seleccionaron mediante el método de selección de árboles representativos descrito (Hapla & Saborowski 1987; Zapata *et al.* 2020; Zapata *et al.* 2021).

6.2.4. Procedimientos de medición

En cada una de las 24 semanas de la primera fase, se registraron los valores de los dos componentes de la señal eléctrica (tensión V y corriente de cortocircuito ISC) y se midió el contenido de humedad (MC%) de diez árboles cada semana.

Estas mediciones se realizaron en las 24 semanas más calurosas y secas del año, desde un mes antes del inicio de la temporada oficial de incendios forestales en la Comunidad Valenciana (mayo de 2021) hasta un mes después del final de la misma (octubre de 2021). Todas las mediciones semanales se realizaron los sábados a las 12:00 h CET, ya que es la hora para la que se realizan las predicciones de riesgo de incendios forestales según el sistema *Fire Weather Index* (FWI) de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). Además, como se ha podido demostrar en el segundo capítulo

de la tesis, las horas centrales del día, próximas al cenit, son los momentos en los que el árbol presenta el mínimo valor de señal eléctrica (Zapata *et al.* 2021).

Para la segunda fase, se evaluaron retrospectivamente los valores de tensión e *ISC* utilizados en los anteriores capítulos de la tesis (Zapata *et al.* 2021). Estos valores de señal eléctrica se recogieron semanalmente, utilizando el mismo protocolo de adquisición de datos empleado en el presente estudio, desde mayo de 2018.

6.2.4.1. Medición de la señal eléctrica

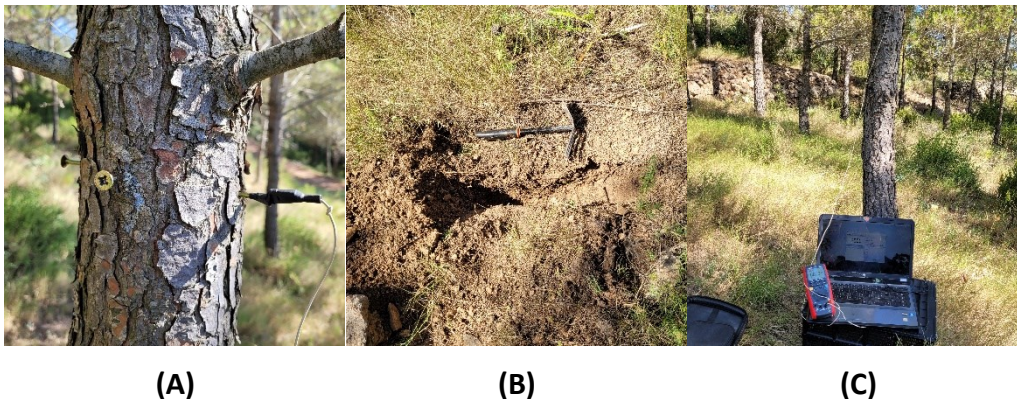
Los valores de tensión *V* y corriente de cortocircuito *ISC* de los árboles se midieron entre los electrodos insertados en el fuste y el electrodo enterrado en el suelo. Para la realización de este trabajo se utilizaron electrodos con las mismas características que los de los dos capítulos anteriores de la tesis (Zapata *et al.* 2020; Zapata *et al.* 2021), así como los utilizados por otros autores (Cardoso *et al.* 2004; Gibert *et al.* 2006; Hao *et al.* 2021; Volkov & Ranatunga 2006).

Se utilizaron dos tipos de electrodos según su función.

a) El electrodo utilizado en el árbol, de acero inoxidable, se insertó directamente en el fuste a 1,5 m del suelo a una profundidad suficiente para garantizar el contacto con el tejido del floema. Se eligió una forma de tornillo debido a su mayor facilidad de inserción y retirada de los árboles, causando sólo una menor herida. Además, gracias a la espiral de tornillo, estos electrodos tienen una mayor superficie de contacto con el tejido vegetativo en comparación con los electrodos cilíndricos lisos. Así, estos electrodos se introdujeron en el fuste asegurando el contacto con el tejido floemático, insertándolos con una llave dinamométrica, lo que nos permitió detectar el cambio en la dureza del tejido. Esta última acción la consideramos fundamental, ya que las señales eléctricas se transmiten más fácilmente a través de este tejido, dada su menor resistencia al flujo eléctrico, en comparación con otros tejidos vegetales (Oyarce & Gurovich 2010).

b) El segundo tipo era un electrodo de platino (Pt-Ir) no polarizado (Comisión Europea 1999), que se utilizaba como referencia de tierra. Estos electrodos se enterraron en el suelo mineral a una profundidad de entre 20 y 25 cm una vez retirada la capa superior de tierra vegetal. Cabe señalar que, dadas las condiciones naturales en las que se realizaron los experimentos, no pudimos instalar el electrodo de referencia a mayor profundidad debido a la dureza del suelo y a la presencia de rocas.

Ambos electrodos se conectaron al equipo de medición mediante conectores eléctricos y un cable conductor de cobre de 0,5 mm aislado con una funda de plástico flexible (ver figura 26).



(A) **(B)** **(C)**
 Figura 26. Electrodo de árbol (A), colocación del electrodo de tierra (B), disposición del equipo de medición (C).

El equipo utilizado para la medición de la tensión V e ISC fue un multímetro UT71D UNIT con una impedancia de entrada de $2,5\text{ G}\Omega$ y una precisión de $0,1\% \pm 2\text{ mV}$.

6.2.4.2. Medición del contenido de humedad

Para la medición del contenido de humedad (MC), las muestras físicas se llevaron al laboratorio, siguiendo las recomendaciones metodológicas del CSIC-INIA-CIFOR (Madrigal *et al.* 2013; SALTUS 1997).

a) Trabajo de campo:

Se tomaron las siguientes muestras de la primera rama viva y sana de la parte inferior de la copa:

Fracción 1 (BB): se tomaron muestras de la base de la rama con una frecuencia semanal, con diámetros de 20-30 mm y 5-10 cm de longitud, sin acículas, para compararlo con la metodología no destructiva del contenido de humedad.

Fracción 2 (BM): se tomaron muestras del centro de la rama con una frecuencia mensual, con diámetros de 10-20 mm y 5-10 cm de longitud, sin acículas.

Fracción 3 (LF): se tomaron muestras de la parte final de la rama con una frecuencia mensual, con diámetros <10 mm, con ramitas y acículas, sin conos.

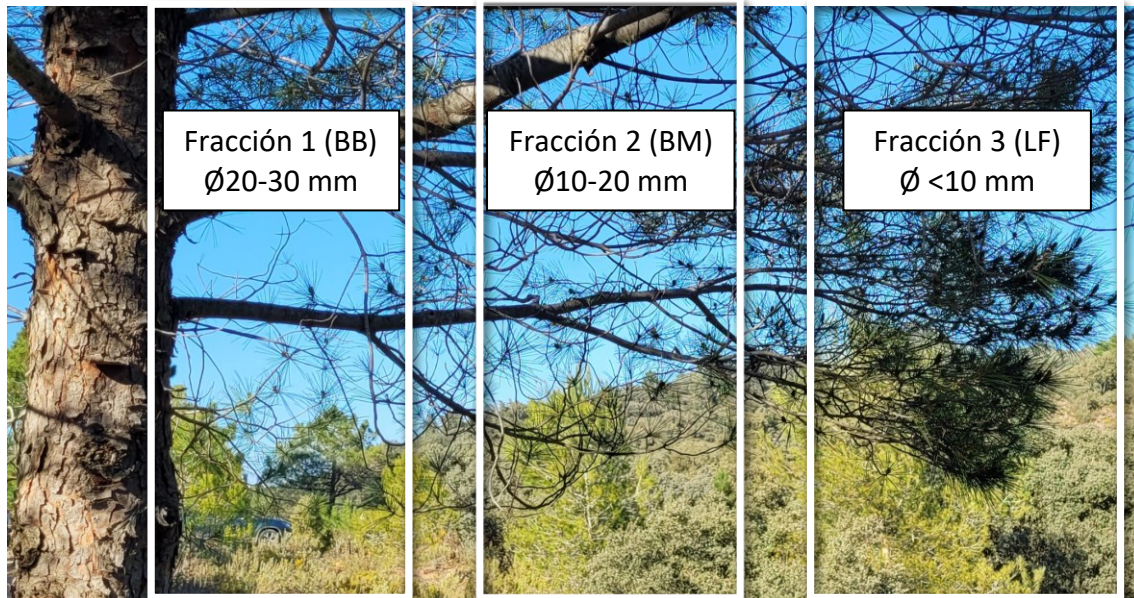


Figura 27. Fracciones de muestreo para medición del contenido de humedad (MC).

Las muestras se tomaron siempre los sábados entre las 12:05 y las 14:00 CEST. Cada muestra se colocó en un recipiente de plástico herméticamente cerrado, se identificó con los datos de referencia y se transportó inmediatamente al laboratorio.

b) Trabajo de laboratorio:

Las muestras se pesaron en una balanza de precisión en estado verde. Después de secarlas en un horno a 105 °C durante 24 h hasta obtener un peso constante, se pesaron en estado anhidro. El contenido de humedad (MC%) se calcula con la fórmula:

$$MC\% = \frac{\text{peso húmedo} - \text{peso después del secado}}{\text{peso después del secado}} * 100$$

6.2.5. Series temporales meteorológicas

Los datos meteorológicos de la zona fueron proporcionados por una estación meteorológica profesional instalada en 39°46'10.12" N, 00°31'14.19" O. La estación meteorológica es un modelo Davis Vantage VUE propiedad de la Asociación Valenciana de Meteorología (AVAMET).

6.2.6. Evaluación del riesgo de incendios forestales

La Agencia Estatal de Meteorología (AEMET) publica diariamente el FWI oficial [Agencia Estatal de Meteorología]. Los datos son abiertos y están disponibles online a través de sus servicios web. Hemos utilizado los datos registrados para la región de Valencia, definida como Zona 3, donde se encuentra nuestro rodal piloto. Los niveles de FWI están coloreados de verde (riesgo bajo) a rojo (riesgo extremo).

6.3. Resultados y discusión

6.3.1. Comparación entre el contenido de humedad en diferentes fracciones de ramas vivas

La figura 28 muestra los datos de laboratorio obtenidos para el contenido de humedad en las tres fracciones de rama durante los seis meses de medición. Para todas las medidas tomadas durante este periodo, el valor medio obtenido para el contenido de humedad medido en la base de la rama (BBMC%) es 91,92%, con una desviación estándar (std) de $\pm 9,12\%$, muy similar al valor medio para el contenido de humedad medido en la mitad de la rama (BMMC% = 91,18%, std $\pm 12,06\%$) y ligeramente por debajo del valor medio obtenido para el contenido de humedad del combustible vivo fino (LFMC% = 98,17%, std $\pm 10,27\%$). Otros autores informaron de valores muy similares de LFMC% medidos en acículas y ramillas para pinos mediterráneos (Costa-Saura *et al.* 2021; Nolan *et al.* 2016; Sancho & Quílez 2007).

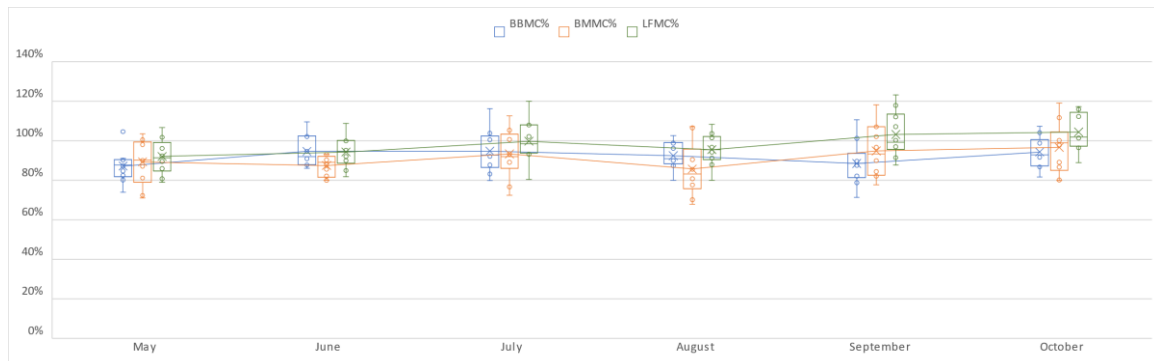


Figura 28. Comparación entre el contenido de humedad en diferentes fracciones de la rama de *Pinus halepensis* de mayo a octubre de 2021: base de la rama (BBMC%, mitad de la rama (BMMC%) y combustible vivo fino (LFMC%).

Para analizar las posibles diferencias significativas entre BBMC%, BMMC% y FMC%, se realizan varias pruebas ANOVA para el periodo total de muestreo y para cada mes entre las tres fracciones. La tabla 8 muestra los resultados.

Tabla 8. Resultados del análisis de varianza (ANOVA) entre BBMC%, BMMC% y LFMC%.

Muestra	F	Pr > F	p-Value	α	Resultado
Mayo	0.714	0.499	0.381	0.05	diferencias no significativas
Junio	1.278	0.295	0.837	0.05	diferencias no significativas
Julio	1.211	0.314	0.863	0.05	diferencias no significativas
Agosto	1.461	0.250	0.295	0.05	diferencias no significativas
Septiembre	3.793	0.035	0.646	0.05	diferencias no significativas
Octubre	2.516	0.100	0.389	0.05	diferencias no significativas
Periodo Total	7.367	0.001	0.208	0.05	diferencias no significativas

Aunque los valores obtenidos para LFMC% son ligeramente superiores a los de BBMC% y BMMC% para la muestra total, así como para los meses individuales (entre un 5 y un 10%), los análisis de varianza demuestran que estas diferencias no son significativas, ni para las muestras individuales de cada mes ni para la muestra total. Los análisis residuales normalizados que se muestran en la figura 29 también demuestran este resultado.

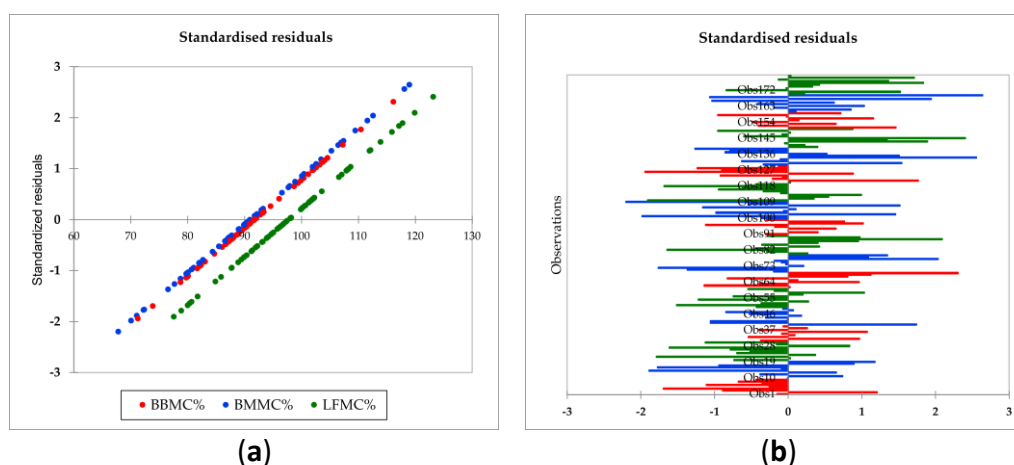


Figura 29. Análisis residual estandarizado entre BBMC%, BMMC% y LFMC% para el periodo total (a) y residual estandarizado frente al total de observaciones (b).

Los resultados obtenidos demuestran que no existen diferencias significativas entre el contenido de humedad de las tres fracciones de ramas (BBMC%, BMMC% y LFMC%). En este sentido, las muestras de bases de ramas vivas pueden ser representativas del contenido de humedad para todo el combustible vivo. Siguiendo a Mitsopoulos & Dimitrakopoulos (2007), los combustibles aéreos vivos que se consumen durante los incendios de copa en los bosques de *Pinus halepensis* están compuestos por acículas (16,7%), ramillas de 0,0-0,63 cm de diámetro (12,6%), ramas de 0,64-7,5 cm de diámetro (62,7%), y ramas >7,5 cm de diámetro (3,7%). Tomar el BBMC% como

medida de referencia en la base de la primera rama viva en árboles en pie abre una oportunidad para el seguimiento mediante medidores de humedad sensorizados, por ejemplo, mediante resistencia eléctrica o dispositivos capacitivos.

6.3.2. Variabilidad estacional del contenido de humedad del combustible vivo

La figura 30 muestra visualmente los valores obtenidos para el contenido de humedad de las tres fracciones (BBMC%, BMMC% y LFMC%) de la primera rama viva durante las 24 semanas de medición en la estación crítica de riesgo de incendios forestales, es decir, desde finales de primavera hasta principios de otoño de 2021.



Figura 30. Variabilidad estacional del contenido de humedad de la primera rama viva (BBMC%, BMMC% y LFMC%) en comparación con la tensión V durante las 24 semanas desde finales de primavera hasta principios de otoño de 2021.

El primer análisis visual indica que *Pinus halepensis* no presenta variaciones estacionales claras del contenido de humedad, ni en las fracciones leñosas de las ramas (BBMC% y BMMC%) ni en el material vivo fino (LFMC%), incluso durante las condiciones de estrés hídrico de las semanas cálidas y secas del verano. Tras comprobar la distribución normal de las muestras, una prueba ANOVA entre los 24 valores medios de las mediciones semanales para BBMC% muestra también diferencias no significativas ($F = 1,38$, $p < 0,001$). Además, se pueden demostrar diferencias no significativas entre las mediciones mensuales de BBMC% ($F = 1,34$, $p < 0,001$) así como de LFMC% ($F = 2,75$, $p < 0,001$). Por último, la figura 30 también muestra mediante los gráficos de cajas y bigotes que la variación entre los 10 árboles medidos en cada ensayo de medición es muy baja. Las pruebas ANOVA individuales muestran diferencias no significativas del contenido de humedad para las tres variables (BBMC%, BMMC% y LFMC%) entre árboles ($p < 0,001$). Otros autores reportaron un comportamiento muy similar del LFMC% de los pinos mediterráneos

[Costa-Saura *et al.* 2021; Nolan *et al.* 2016; Sancho & Quílez 2007), no pudiendo tampoco demostrar variaciones estacionales representativas ni significativas.

6.3.3. Variabilidad estacional de las señales eléctricas en los árboles

La tabla 9 presenta los resultados totales obtenidos para las medidas de señal eléctrica: tensión V e ISC . Tanto la tensión como la corriente de cortocircuito ISC presentan variaciones muy superiores a las medidas de humedad. Así, la tensión presenta un valor medio de $V = 0,808$ V con una desviación típica ($std = \pm 0,381$ V) y una varianza muy elevadas. El mismo comportamiento heterogéneo presenta la ISC con un valor medio de $ISC = 1,998$ mA y $std = \pm 2,531$ mA.

Tabla 9. Estadísticas descriptivas de los resultados de tensión (V) y de corriente de cortocircuito (ISC) de 240 muestras medidas en 24 semanas desde finales de primavera hasta principios de otoño de 2021.

	Señales eléctricas	
	Tensión (V)	ISC (μ A)
Media	0.808	1.998
Mediana	0.990	1.100
Mínimo	0.032	0.000
Máximo	1.124	15.690
Desviación típica (n - 1)	0.381	2.531
1er Cuartil	0.569	0.238
3er Cuartil	1.081	2.735
Varianza (n - 1)	0.145	6.408

Estos valores heterogéneos pueden explicarse mediante el análisis de las variaciones estacionales. Así, la figura 30 muestra también los resultados obtenidos para la tensión medido en los árboles durante las 24 semanas de mayor riesgo de incendios forestales, desde finales de primavera hasta principios de otoño de 2021.

Los resultados obtenidos muestran claramente que las señales eléctricas máximas medidas en los árboles coinciden con las dos estaciones de crecimiento de *Pinus halepensis*, concretamente primavera y otoño (Matamoros *et al.* 2008; Puértolas *et al.* 2005). Por lo tanto, con esto, podemos asociar los momentos en los que las condiciones ambientales son favorables para el crecimiento de los árboles con los valores más altos de la señal eléctrica. Por el contrario, los periodos en los que las

condiciones ambientales se hacen más difíciles para la supervivencia de los pinos, concretamente en condiciones de fuerte sequía por falta continuada de lluvias y temperaturas muy elevadas, el árbol nos da una clara reducción de la señal eléctrica, que se observa más claramente en el caso de la tensión, con reducciones de hasta el 90% y, en todo caso, de más del 50%.

Por lo tanto, las variaciones estacionales de tensión en *Pinus halepensis* observadas, pueden interpretarse como el resultado directo de una pérdida de conductividad durante las condiciones climáticas en los días más secos del verano. En este sentido, Fotelli *et al.* (2019) demuestran que, durante los periodos xerotérmicos, *Pinus halepensis* tiene un comportamiento isohídrico típico: la fotosíntesis máxima, el flujo de savia y la conductancia estomática disminuyen a través del control estomático para limitar la reducción del potencial hídrico y la pérdida de conductividad. Esta pérdida de flujo de savia y conductividad también se ha observado en varios estudios (Sánchez-Costa *et al.* 2015). Las respuestas eléctricas como la tensión parecen estar directamente relacionadas con la conductividad del flujo de savia, por lo que deberían llevarse a cabo más actividades de investigación para analizar en detalle esta relación.

6.3.4. Relación entre la humedad del combustible vivo y las señales eléctricas

Como se ha mostrado en los capítulos anteriores, el LFMC de *Pinus halepensis* no presenta variaciones significativas a lo largo del periodo más cálido y seco del año, sin llegar a mostrar una disminución significativa en los meses calurosos de verano, al contrario que las señales eléctricas, especialmente la tensión. Así, el análisis detallado muestra que las curvas de tensión permanecen más o menos constantes durante los meses de mayo y junio, así como desde principios de septiembre hasta finales de octubre. Sin embargo, en cuanto las condiciones estivales extremas, con temperaturas elevadas y precipitaciones muy escasas, dominan los meses centrales del verano (julio y agosto), los valores de tensión descienden de forma muy clara y significativa. La tensión más o menos constante de alrededor de $V \approx 1$ V disminuye claramente por debajo de $V < 0,5$ V en las nueve semanas comprendidas entre principios de julio y finales de agosto, e incluso drásticamente durante las semanas centrales de finales de julio y principios de agosto con $V < 0,1$ V. De hecho, las curvas de contenido de humedad y de tensión están estrechamente alineadas durante mayo y junio, desacoplándose muy claramente durante la parte central del verano en julio y agosto, y volviendo a acoplarse a partir de principios de septiembre.

Además, las figuras 31 y 32 muestran que la precipitación, la temperatura y la humedad relativa del aire no ejercen una influencia directa sobre el LFMC de *Pinus halepensis*. Ni siquiera se observan cambios apreciables en BBMC%, BMMC% o LFMC% en las semanas centrales del verano de finales de julio y principios de agosto, con los días más calurosos y secos, especialmente el 24 de julio y el 7 de agosto de 2021, que fueron clasificados como de riesgo extremo por las agencias meteorológicas y de lucha contra incendios, siguiendo los criterios de FWI (AEMET).

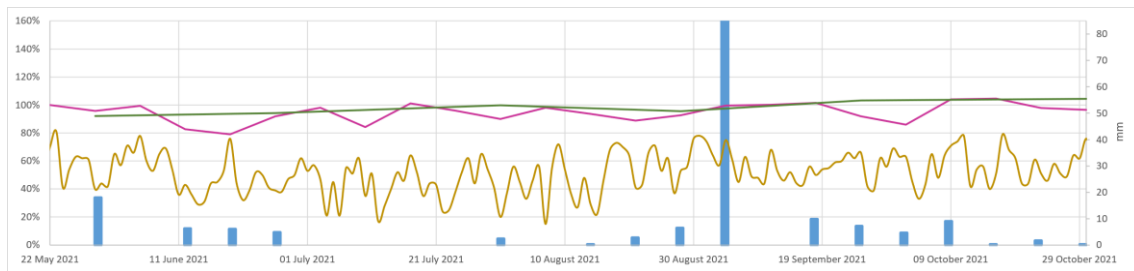


Figura 31. Contenido de humedad (BBMC%, línea morada y LFMC%, línea verde) frente a las precipitaciones acumuladas semanalmente (columna azul) y la humedad relativa (línea marrón claro) durante las 24 semanas de estudio.

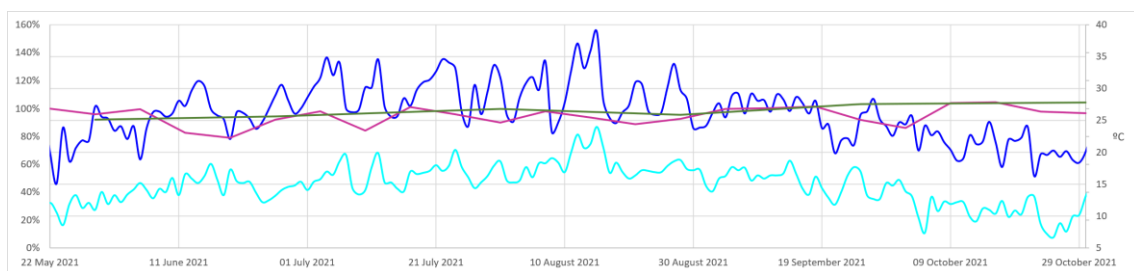


Figura 32. Contenido de humedad (BBMC%, línea morada y LFMC%, línea verde) frente a las temperaturas máximas (línea azul oscuro) y mínimas (línea azul claro) diarias.

Los resultados obtenidos demuestran que el contenido de humedad (BBMC% o incluso LFMC%) no presenta variaciones estacionales representativas en *Pinus halepensis* y no es capaz de reaccionar directa o rápidamente a condiciones extremas de sequía. La caracterización de la estructura del combustible y su relevancia para el comportamiento del fuego ha sido objeto de numerosas investigaciones en MTE (Keane 2015). Así, a menudo se tienen en cuenta las variaciones en el LFMC%, aunque todavía hay algunas discusiones activas sobre su papel en la propagación del fuego (de Dios & Rinaudo 2020). Algunos estudios han abordado el papel de la LFMC en el comportamiento del fuego (Alexander & Cruz 2013). Otros han abordado cómo el secado del dosel, tras plagas de escarabajos de la corteza, por ejemplo, afecta al

comportamiento del fuego (Jenkins *et al.* 2012; Reiner 2017; Talucci & Krawchuk 2019).

En nuestra investigación, el contenido de humedad medido en las ramas vivas de *Pinus halepensis* (incluyendo LFMC%) no muestra variaciones estacionales representativas, con valores entre 80 y 100%, lo que es consistente con otros estudios con esta especie (Costa-Saura *et al.* 2021). Aunque el LFMC% es considerado como un importante determinante de la inflamabilidad forestal en condiciones mediterráneas (Nolan *et al.* 2020), otros autores demuestran que incluso otros pinos mediterráneos muestran también variaciones estacionales del LFMC% muy limitadas: *Pinus pinaster* 90%-100% (Soler Martin *et al.* 2017) y *Pinus nigra* 95%-115% (Nolan *et al.* 2018). Estos pinos muestran un comportamiento isohídrico (Fotelli *et al.* 2019), es decir, poca variación en el potencial hídrico foliar al mediodía, y una regulación relativamente estricta de los estomas en respuesta a la desecación del suelo (Nolan *et al.* 2018). Los pinos mediterráneos están adaptados a las condiciones xerotérmicas (altas temperaturas y sequías) del verano, debido a su estrategia, para evitar la sequía, de reducir la conductancia estomática bajo escasez de agua (Klein *et al.* 2011). El *Pinus halepensis* mostró una estrategia de ahorro de agua y evitación de la sequía (isohídrica) a través del control estomático en respuesta a la sequía estival (Klein *et al.* 2016; Oliveras *et al.* 2003). La especie se benefició de los periodos de alta disponibilidad de agua en el suelo (normalmente de otoño a primavera) (Pacheco *et al.* 2018; Prislán *et al.* 2016). Estos episodios de sequía no influyen directamente en el contenido de humedad a nivel de ramas y hojas (Sancho & Quílez 2007; Schiller & Cohen 1995), por lo que la medida directa del LFMC% de los pinos mediterráneos no debería considerarse como el único indicador apropiado para monitorizar el riesgo de incendios forestales. Además, fuertes condiciones de sequía y consecuentemente alta evapotranspiración conllevan respuestas fisiológicas en ramas y acículas de *Pinus halepensis*. Así, Fotelli *et al.* (2019) demuestran que, en los periodos xerotérmicos, el comportamiento isohídrico típico exhibido por *Pinus halepensis*, la fotosíntesis máxima, el flujo de savia y la conductancia estomática disminuyeron a través del control estomático para limitar la reducción del potencial hídrico y la pérdida de conductividad. Esta pérdida de flujo de savia y conductividad también se ha observado en varios estudios (Sánchez-Costa *et al.* 2015). Sin embargo, en periodos en los que la disponibilidad de agua no era un factor limitante, esta especie era capaz de maximizar su ganancia de carbono si otros parámetros de control, como la temperatura del aire y la radiación neta, aseguraban simultáneamente un régimen ambiental favorable (Fotelli *et al.* 2019).

Por el contrario, LFMC% sí presenta variaciones estacionales representativas en algunas especies arbustivas mediterráneas. Así, en comparación con los resultados obtenidos para *Pinus halepensis* (y los observados para otros pinos mediterráneos), los principales arbustos que forman parte de ETM se comportan de forma significativamente diferente (Schiller & Cohen 1995). Especialmente relevante es la

variación estacional en el LFMC% de *Rosmarinus officinalis*, con valores mínimos del 40% en verano y máximos del 140% en otoño, invierno y primavera (Costa-Saura *et al.* 2021; Pellizzaro *et al.* 2007; Puértolas *et al.* 2005). También otras especies, como *Ulex parviflorus* (60%-120%), *Erica multiflora* (50%-90%) o *Juniperus oxycedrus* (65%-100%) muestran variaciones estacionales muy claras (Matamoros *et al.* 2008; Sancho & Quílez 2007). Esto explica, sin duda, la importancia que el descenso estival del LFMC% tiene sobre la vulnerabilidad ante los incendios forestales en matorrales (Quílez *et al.* 2016). Sin duda, para futuras investigaciones, sería muy interesante relacionar la variación del LFMC% y su relación con la tensión en estos matorrales, ya que han mostrado patrones de comportamiento muy similares.

Siguiendo nuestros resultados, parece muy difícil evaluar y monitorizar la vulnerabilidad de los pinares mediterráneos al riesgo de incendios forestales sólo en función del LFMC% de los pinos. Además, existen otros rasgos fisiológicos de las plantas que parecen explicar mejor el alto riesgo de incendios forestales en épocas de sequía, especialmente el potencial osmótico, el flujo de savia, el marchitamiento y la senescencia de las acículas o la presencia y evolución del combustible muerto. La dinámica del combustible, como resultado de la respuesta fisiológica de los pinos a las condiciones de sequía, tiene que ser analizada integrando variables resultantes del estrés hídrico (contenido de agua en el suelo y rasgos de la planta, incluyendo patrones de enraizamiento, y rasgos foliares como el punto de pérdida de turgencia, el potencial osmótico, el flujo de savia, la elasticidad y la masa foliar por área), pero también la relación entre combustibles muertos y vivos (Balaguer-Romano *et al.* 2020; Qi *et al.* 2014). En este sentido, la cavitación de las acículas y su posterior desprendimiento es de particular relevancia para los pinos, transformando el combustible vivo verde en combustible muerto, totalmente seco, y por tanto más fácil de encender (Nolan *et al.* 2020). Por esta razón, es necesario investigar la dinámica estacional del combustible desde una perspectiva más integral, complementando la medición del LFMC%. Todas las variables resultantes de las respuestas fisiológicas que puedan influir en el riesgo de incendio y que puedan ser fácilmente medidas y monitorizadas, incluyendo las señales eléctricas, deberían integrarse en los modelos de riesgo.

6.3.5. Relación entre las señales eléctricas y el riesgo de incendios forestales

a) Evaluación del estudio de 24 semanas en el año 2021

Se ha realizado un primer análisis de la relación entre las señales eléctricas y el riesgo de incendio forestal, comparando los valores medios tanto de tensión como de la ISC

para cada semana (siempre medidos los sábados) con el riesgo de incendio forestal siguiendo los criterios del FWI de esos mismos días, considerando para ello la temperatura máxima diaria, la humedad relativa mínima, la velocidad máxima del viento y las precipitaciones. Los resultados obtenidos se muestran gráficamente en las figuras 33 y 34.

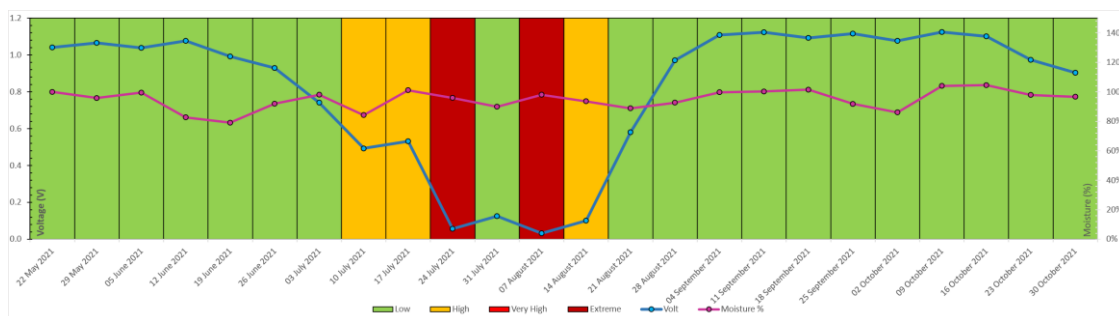


Figura 33. Valores medios de tensión V (línea azul) y BBMC% (línea rosa) frente a la clasificación FWI de las mediciones según los criterios FWI durante las 24 semanas de estudio (color de fondo).

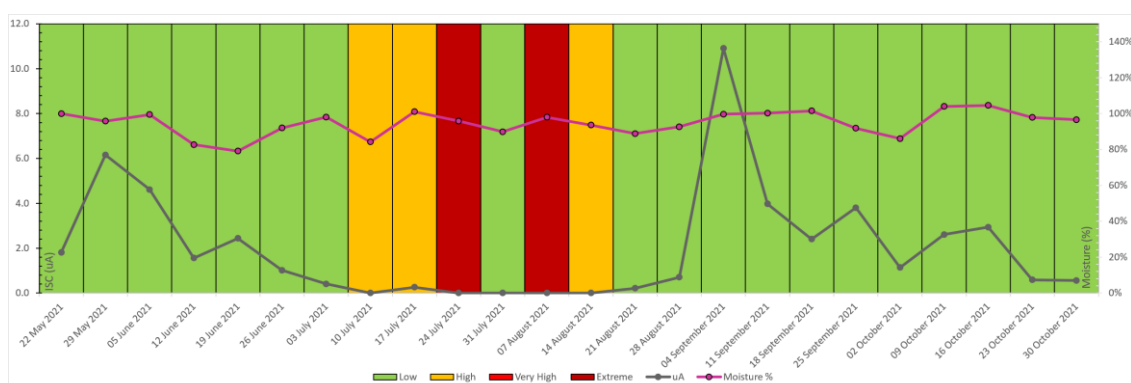


Figura 34. Valores medios de corriente de cortocircuito ISC (μA marcado en la figura con una línea gris oscura) y BBMC% (línea rosa) frente a la clasificación FWI de las mediciones según los criterios FWI durante las 24 semanas de estudio (color de fondo).

Los resultados obtenidos no pueden demostrar una correlación representativa entre el contenido de humedad y el FWI. Los valores más altos de FWI, y en consecuencia lo más duro de la temporada de incendios en la cuenca mediterránea occidental ocurre normalmente durante Julio (Balaguer-Romano *et al.* 2020), mientras que los valores observados de contenido de humedad no muestran ninguna reducción, como también observaron Qi *et al.* (2014). Soler Martin *et al.* (2017) demuestran que no se registraron cambios estacionales del LFMC durante el verano en acículas y ramas pequeñas en masas de *Pinus pinaster*, contrariamente a las predicciones del FWI, lo que coincide plenamente con los resultados obtenidos en nuestro estudio para *Pinus halepensis*.

Estos resultados demuestran que ambas señales eléctricas medidas (tensión V y corriente de cortocircuito ISC) muestran una notable reducción durante el periodo estival, alcanzando los valores mínimos en los días en los que el FWI en el rodal piloto fue clasificado como extremo (AEMET). Sin embargo, los resultados para la tensión son mucho más claros y significativos en relación con FWI que los resultados obtenidos para la ISC .

b) Evaluación retrospectiva de tres años (2018-2021)

Se han estado realizando mediciones de señales eléctricas, concretamente de tensión, en el rodal piloto desde mayo de 2018 hasta octubre de 2021, de forma que hemos podido hacer una evaluación a largo plazo de la relación entre la tensión y FWI. La figura 35 muestra en gráficos de cajas y bigotes la media, desviación estándar y mínimo-máximo para todos los días durante los tres años clasificados por categorías de riesgo de incendio forestal (bajo, alto, muy alto, extremo) siguiendo los criterios de FWI.

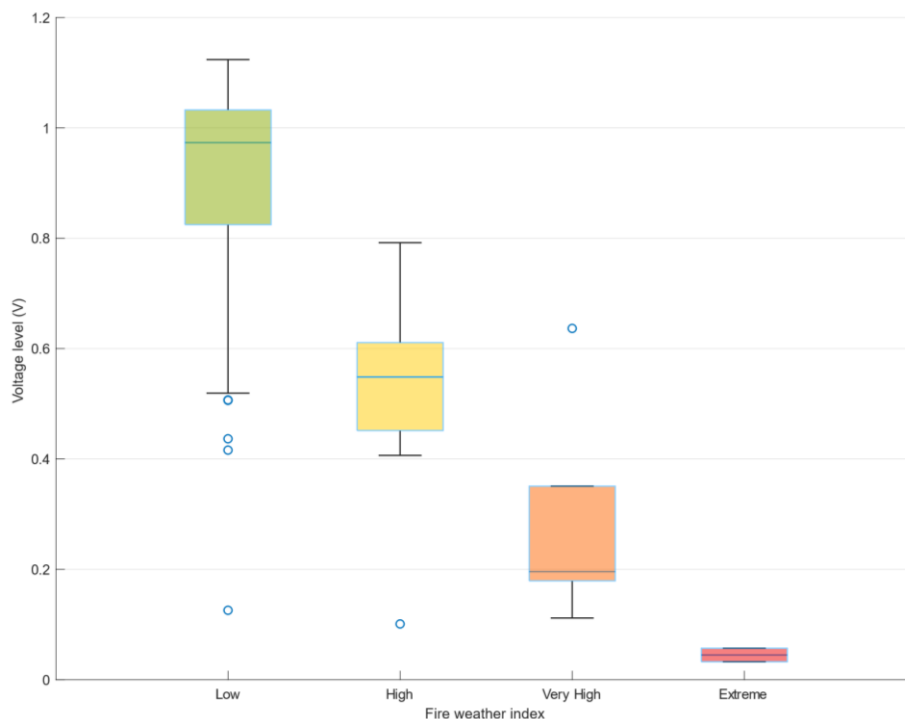


Figura 35. Valores de tensión V para todos los días medidos desde mayo de 2018 hasta octubre de 2021 clasificados por categorías de FWI (riesgo de incendio forestal bajo, alto, muy alto y extremo).

La primera interpretación de los resultados permite observar que los valores medios obtenidos para la tensión en las cuatro categorías de FWI son significativamente diferentes, reduciéndose claramente la tensión a medida que aumenta el riesgo. Una prueba ANOVA corrobora también que las diferencias observadas son estadísticamente muy significativas ($F = 39,138$, $p < 0,001$). Así, mientras que FWI bajo presenta una media de 0,90 V, la clase FWI alto disminuye a 0,53 V y la clase FWI muy alto a 0,28 V, alcanzando la clase FWI extremo una media de sólo 0,04 V.

Por último, este análisis también muestra que en los días con bajo riesgo de incendio (FWI *low*) prácticamente todos los valores (96%) superan ampliamente $>0,5$ V. Incluso el 81% supera el umbral de $>0,8$ V. Por otro lado, en los días clasificados como de riesgo muy alto (FWI *very high*) y riesgo extremo (FWI *extreme*), sólo uno de todos los valores (88%) supera $>0,4$ V, incluso el 100% de los de riesgo extremo no supera ni siquiera $>0,1$ V.

El nivel de tensión es el resultado de la respuesta fisiológica de *Pinus halepensis* al estrés abiótico de la sequía en verano. Es un parámetro eléctrico fácil de medir, así como un indicador muy fiable con una alta correlación (Mukaka 2012) con el riesgo de incendios forestales. Habiendo obtenido un coeficiente de correlación de rango de Spearman de $R^2 = 0,6816$ ($p < 0,001$) entre el índice FWI y los valores brutos de tensión para el estudio de 24 semanas en 2021, la misma prueba para el periodo 2018-2021 aumenta a $R^2 = 0,7816$ ($p < 0,001$). Tenemos que señalar que nuestra investigación es un estudio pionero en vincular las señales eléctricas con la fisiología de las plantas en un contexto de gestión del riesgo de incendios forestales, y nuestros resultados demuestran el potencial de incorporar las respuestas eléctricas como uno de los rasgos ecofisiológicos de las plantas para investigar los cambios estacionales en el riesgo de ignición de incendios forestales y la inflamabilidad.

6.4. Conclusiones

Las conclusiones más importantes que podemos extraer de la investigación son las siguientes:

- No se han observado diferencias significativas entre el contenido de humedad de las distintas fracciones de las ramas de *Pinus halepensis* (base de la rama, mitad de la rama y ramillas y acículas como combustible vivo), incluso en épocas de sequía con estrés hídrico y temperaturas muy elevadas.
- El LFMC no ha mostrado variaciones significativas bajo la influencia de factores extremos de riesgo de incendio en la época estival. Por esta razón, debería complementarse con otras variables fiables para la evaluación y seguimiento del riesgo de incendio en las MTE dominadas por *Pinus halepensis*. Así, en la evaluación y modelización del alto riesgo de incendios forestales en masas de *Pinus halepensis* en épocas de estrés hídrico y altas temperaturas deben integrarse otros rasgos fisiológicos de la planta, relacionados tanto con la dinámica hidráulica (potencial osmótico, flujo de savia) como con el combustible muerto (marchitez y senescencia de acículas, presencia y evolución del combustible muerto). Sin embargo, dado que el LFMC% responde mejor a las condiciones de riesgo de incendio en algunas especies arbustivas en MTE, proponemos analizar en profundidad la relación entre el LFMC% y las respuestas eléctricas en estos arbustos.
- Las variaciones registradas en la señal eléctrica generada en *Pinus halepensis* muestran oscilaciones con variaciones significativas, que están fuertemente correlacionadas con los periodos de condiciones meteorológicas extremadamente favorables para los incendios forestales ($R^2 = 0,78$).
- Las tensiones medidas muestran rangos que corresponden con gran exactitud a los niveles oficiales de riesgo de incendio basados en el sistema FWI.
- Las señales eléctricas, concretamente la tensión, son el resultado de la respuesta fisiológica de los pinos mediterráneos al estrés abiótico de la sequía en verano. Se trata de un parámetro eléctrico fácil de medir, así como de un indicador muy fiable con una alta correlación con el riesgo de incendios forestales.
- Las respuestas electrofisiológicas podrían añadir más conocimiento sobre el estado fenológico de los árboles en dependencia de las condiciones climáticas de estrés, permitiendo la integración de estas variables en la gestión preventiva de

incendios forestales. Aunque para ello también consideramos que es necesaria una investigación más profunda.

- Por último, los resultados obtenidos y los conocimientos adquiridos permiten explorar nuevas posibilidades para el desarrollo de sensores terrestres inalámbricos basados en la medición de la tensión, que permitan la vigilancia en línea del riesgo de ignición y propagación de incendios forestales con una resolución espacial y temporal potencialmente máxima.

7. CONCLUSIONES GENERALES

El diseño experimental y la investigación realizada en la presente tesis ha permitido avanzar significativamente en el conocimiento acerca de las características y propiedades electrofisiológicas del *Pinus halepensis* en condiciones naturales dentro de un ecosistema forestal mediterráneo. Este conocimiento científico riguroso acerca de la actividad eléctrica de una de las especies arbóreas forestales de mayor importancia dentro de la cuenca mediterránea nos ha permitido sentar las bases de una línea de trabajo innovadora en la evaluación del riesgo de incendio forestal por parámetros electrofisiológicos, principalmente la tensión, en función de las condiciones climáticas que llevan a un mayor estrés hídrico y, en consecuencia, a un mayor riesgo de incendio. Mediante este conocimiento adquirido será posible complementar las variables utilizadas en la actualidad para el cálculo del nivel de riesgo (principalmente variables meteorológicas, contenido en humedad del combustible vivo y modelos de combustible vegetal), con una variable biológica que representa el estado fenológico de los árboles, a partir de la adquisición de datos de una forma sencilla a través de la monitorización de la actividad electrofisiológica del arbolado y sin los inconvenientes demostrados de otras técnicas empleadas con la misma finalidad.

Así, tras evaluar y discutir los resultados obtenidos en la totalidad de la investigación, se pueden extraer las siguientes conclusiones.

a) Comportamiento de los parámetros electrofisiológicos a nivel individual en cada árbol de *Pinus halepensis*

A nivel individual de cada árbol, en una medición estática en el tiempo, se ha podido concluir que los dos componentes de la señal eléctrica en *Pinus halepensis* (tensión V y corriente de cortocircuito ISC) muestran una distribución homogénea dentro del fuste de cada individuo, pudiendo demostrar en la existencia de una señal eléctrica que no muestra variaciones significativas en mediciones puntuales, con independencia de la altura de medición o la orientación del lugar de inserción del electrodo de medición en el fuste de un individuo.

Por otro lado, se ha podido alcanzar mediante una medición estática la confirmación del sentido de flujo que siguen los electrones entre el suelo y el árbol, dando como resultado una diferencia de potencial negativo en el árbol respecto del suelo.

Conjuntamente, también se pudo demostrar que los árboles de edades juveniles presentan una señal eléctrica de mayor amplitud que los árboles de edades avanzadas, mostrando una disminución en la diferencia de potencial eléctrico en su señal electrofisiológica del 74,3% del valor muestreado en los árboles de alrededor de 50 años respecto al valor de tensión registrado en los ejemplares con edades aproximadas de 25 años.

Estos resultados han permitido aumentar el conocimiento acerca de la distribución espacial y la variación por edades de las señales electrofisiológicas, generando una base científica que hasta la fecha no existía.

De forma práctica, los resultados de la investigación nos han dado la oportunidad en primer lugar de conocer la escala de medición más adecuada para la monitorización de la actividad electrofisiológica dependiendo del rango de edad de los árboles a evaluar. También nos han facilitado la optimización de los diseños de los circuitos de monitorización, tanto en la adaptación al sentido de la corriente, como en una reducción considerablemente de la dificultad del trabajo de monitorización de los árboles en el campo, ampliando las posibilidades de instalación de equipos de medida, optimizando la sensibilidad de la instrumentación y el emplazamiento de los electrodos de medición en los árboles dependiendo de las circunstancias.

b) Variación diaria y anual de los parámetros electrofisiológicos en ecosistemas representativos de *Pinus halepensis*

En la escala temporal diaria se pudo documentar que las señales electrofisiológicas que se registran en los *Pinus halepensis* muestran una clara variación en respuesta al cambio día-noche. Este resultado viene a confirmar la relación entre el estado fenológico del árbol con la señal eléctrica, corroborando que el árbol, ante cambios en su ambiente influyente, es capaz de generar cambios en su actividad eléctrica en un rango de respuesta inferior a la hora.

En una escala temporal anual, que comprende un ciclo vegetativo completo, se ha podido determinar que la intensidad eléctrica medida crece exponencialmente con la diferencia de potencial eléctrico medido en *Pinus halepensis*. De hecho, se observó que ninguna *ISC* supera el umbral de 0,01 μA , cuando los valores de son inferiores a 0,6 V. En general, se registraron señales eléctricas más altas durante las estaciones lluviosas con temperaturas moderadas; mientras las señales electrofisiológicas de valores más bajos se obtuvieron, incluidas algunas medidas de intensidad cero, durante los períodos del año calificados de mayor estrés para los árboles, principalmente a mediados del verano, cuando se registran las mayores temperaturas y la mayor carencia hídrica. Además, se ha podido correlacionar fuertemente la *ISC* de

la señal biológica con la precipitación recibida por el árbol. Mostrando así una relación evidente entre la intensidad de las señales electrofisiológicas con el estado fenológico del árbol, permitiendo de esta forma abrir la puerta a la evaluación de la disponibilidad de agua por parte del arbolado.

c) Comparación del comportamiento del contenido de humedad y los parámetros electrofisiológicos

En la presente investigación también se ha podido concluir en base a los resultados obtenidos que no existen diferencias significativas en el contenido de humedad de las distintas fracciones de las ramas de *Pinus halepensis* (base de la rama, mitad de la rama y ramillas y acículas como combustible vivo). Conjuntamente, se pudo determinar que esta homogeneidad se mantiene incluso en los periodos de sequía y altas temperaturas, en los que el árbol sufre un más acusado estrés hídrico. Además, se pudo confirmar que el contenido de humedad de la fracción viva (LFMC) del *Pinus halepensis* no muestra variaciones significativas ante la actuación de factores de influencia en el aumento del riesgo de incendio. Así, en base a estas observaciones se pudo demostrar que en el caso del *Pinus halepensis*, el valor del LFMC debería complementarse con otras variables confiables para la evaluación y el monitoreo del riesgo de incendios.

d) Relación de los valores de los parámetros electrofisiológicos con el riesgo de incendio en masas de *Pinus halepensis*

Las variaciones registradas en la señal eléctrica generada en *Pinus halepensis* muestran oscilaciones estadísticamente significativas. Estas variaciones registradas están fuertemente correlacionadas con los periodos en los que las condiciones meteorológicas se encuentran en valores extremadamente favorables para la ignición y propagación de incendios forestales. Asimismo, a partir de los resultados obtenidos se puede también concluir que, dentro de la señal electrofisiológica generada, los valores de tensión se pueden agrupar en rangos que se corresponden con gran precisión con los niveles oficiales de riesgo de incendio basados en el sistema FWI.

De esta forma, se pudo determinar que las variaciones registradas en las señales electrofisiológicas, en concreto la tensión, son generadas por *Pinus halepensis* como resultado de la respuesta fisiológica ante el estrés abiótico producido por las severas condiciones del verano en el clima mediterráneo. Asimismo, se ha podido demostrar que el valor de tensión registrado es un parámetro eléctrico fácil de medir, con un gran

valor y utilidad, así como un indicador muy confiable del estado fenológico y con una alta correlación con el riesgo de incendios forestales.

e) Aplicación de sensores basados en parámetros electrofisiológicos en la prevención de incendios forestales en masas de *Pinus halepensis*

Como conclusión general de este trabajo de investigación, se puede considerar que las respuestas eléctricas que podemos registrar en *Pinus halepensis* añaden un aumento destacado sobre el conocimiento del estado fenológico de los árboles, de forma especial en los momentos en los que las condiciones ambientales producen estados de estrés hídrico, permitiendo de este modo tener una variable que permita ser registrada de forma sencilla y coherente, y que admite la integración como variable en el modelado y gestión preventiva de los incendios forestales.

Pero, aunque consideramos que se ha generado una base científica en el campo de la electrofisiología arbórea que demuestra el potencial del estudio de las señales eléctricas en *Pinus halepensis*, también creemos necesaria una investigación más profunda hasta llegar al desarrollo de sensores terrestres inalámbricos basados en la medición de tensión, que permitan monitorear en línea el riesgo de ignición y propagación de incendios forestales con una gran resolución espacial y temporal.

8. FUTURAS INVESTIGACIONES

El conocimiento adquirido en la elaboración de la presente tesis ha permitido la exploración de nuevas posibilidades para la monitorización de los riesgos forestales derivados del estrés hídrico en condiciones climáticas extremas, dependientes de la emergencia climática que sufrimos actualmente y en el futuro. Estos riesgos o perturbaciones son principalmente los incendios forestales, pero también las masas debilitadas sufren la afección de plagas (hongos e insectos defoliadores o perforadores), incluso de grandes daños causados por huracanes o nevadas.

El estudio riguroso del comportamiento de los parámetros electrofisiológicos, incluyendo sus variaciones y la comparación con el LFMC, por una parte, y su excelente relación con los principales parámetros de riesgo de incendio, por otra parte, demuestra el potencial que la consecución y tratamiento de los datos tiene para un monitoreo del estado en que se encuentra el bosque con la mayor resolución temporal y espacial posible, con las consiguientes ventajas de ordenación y gestión de los recursos de prevención y extinción de incendios y otras perturbaciones. Sin embargo, los resultados de esta tesis doctoral se deben entender como el fundamento científico para una nueva línea de investigación aplicada que tenga como fin la realización de nuevos trabajos de desarrollo e innovación tecnológica centrados en desarrollar la tecnología para su aplicación práctica: sensores, sistema de comunicación inalámbrica y sistema de gestión de la información y establecimiento de alertas.

En este sentido, con el fin de poder diseñar y desarrollar un proyecto de investigación aplicada y desarrollo tecnológico a partir de los resultados obtenidos en esta tesis, se considera conveniente tener en cuenta los siguientes aspectos en las investigaciones futuras:

a) Con los resultados obtenidos se ha podido observar que la acción meteorológica, tanto en temperatura como en humedad relativa del aire y del suelo, genera cambios significativos en la actividad electrofisiológica de los árboles, pudiéndose además demostrarse una clara correlación con la precipitación. Sin embargo, debe considerarse profundizar más en el conocimiento de la influencia y la contribución de cada parámetro atmosférico y ambiental sobre las variaciones electrofisiológicas que muestra el árbol a lo largo de su ciclo vegetativo, con el objetivo final de poder modelar el comportamiento electrofisiológico de los árboles, no solo de *Pinus halepensis*, sino también de otros árboles y arbustos representativos de la flora presente en los ecosistemas forestales mediterráneos.

b) Por otro lado, los resultados de la investigación han podido demostrar la clara relación de los estados de alerta de riesgo de incendio forestal con la actividad electrofisiológica del arbolado, de forma que estudiar la integración de las variaciones electrofisiológicas del bosque en la evaluación y modelización del riesgo de incendios forestales, tanto en épocas de estrés hídrico y altas temperaturas como en periodos de latencia invernal o debilitación por enfermedades, sería un avance significativo para mejorar la gestión forestal sostenible en adaptación al cambio climático, así como tratar de relacionarlo tanto con la dinámica hidráulica (potencial osmótico, flujo de savia), como con la generación de combustible muerto (marchitamiento y senescencia de las acículas u hojas, presencia y evolución del combustible seco).

c) Esta tesis se ha centrado en el estudio electrofisiológico de una de las especies arbóreas de mayor relevancia y expansión en la cuenca mediterránea occidental, como es el *Pinus halepensis*. No obstante, para futuras investigaciones se considera conveniente la ampliación del estudio electrofisiológico a otras especies de árboles y arbustos presentes en los más representativos ecosistemas forestales mediterráneos, siguiendo la metodología definida y aplicada en la presente investigación. Para ello se deberían considerar otras especies arbóreas como *Pinus pinaster* y *Quercus ilex*, principalmente, pero también especies arbustivas ampliamente presentes en el territorio como *Rosmarinus officinalis* y *Ulex* spp., de forma que se amplíe el conocimiento de las respuestas y comportamiento electrofisiológico de otras especies ante las variaciones ambientales, su estado de actividad fisiológica en función de las condiciones de estrés hídrico y el riesgo de incendios forestales tanto en estratos arbolados como en matorral.

d) Finalmente, un futuro proyecto que pase de la investigación aplicada desarrollada en esta tesis al desarrollo tecnológico y la innovación debería diseñar y fabricar los prototipos de sensores inalámbricos para la medición de la tensión y de la *ISC* en las ramas de árboles representativos distribuidos en el territorio, sensores incluso alimentados por la propia energía del árbol almacenada en condensadores. Los sensores deberían ser conectados con un sistema de monitorización y gestión de manera inalámbrica, con el fin de posibilitar una red de monitoreo con la máxima resolución espacial y temporal.

9. TRANSFERENCIA DE LOS RESULTADOS DE LA INVESTIGACIÓN

9.1.1. Publicaciones científicas de impacto

Como principales resultados de transferencia del conocimiento adquirido en la presente tesis doctoral, cabe destacar que se han presentado tres artículos que han sido publicados en revistas indexadas por el Journal Citation Report (JCR).

Los artículos científicos son:

1. Zapata, R., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Luzuriaga, J. E., Mateo Pla, M. A., & Urchueguía, J. F. (2020). Evaluation of electrical signals in pine trees in a mediterranean forest ecosystem. *Plant Signaling & Behavior*, 15(10), 1795580. <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1795580>
2. Zapata, R., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Fuente, D., Mateo Pla, M. A., Luzuriaga, J. E., & Moreno Esteve, J. C. (2021). Seasonal variations of electrical signals of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions. *Plant Signaling & Behavior*, 16(10), 1948744. <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1948744>
3. Zapata, R., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Mateo Pla, M. A., & Luzuriaga, J. E. (2022). Electrical Responses of *Pinus halepensis* Mill. as an Indicator of Wildfire Risk in Mediterranean Forests by Complementing Live Fuel Moisture. *Forests*, 13(8), 1189. <https://doi.org/10.3390/f13081189>

9.1.2. Comunicaciones en congresos científicos

Otros resultados de transferencia del conocimiento adquirido son las comunicaciones en congresos científicos tanto nacionales como internacionales, que son:

1. Zapata, R., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Mateo Pla, M. A., Luzuriaga, J. E. Seasonal variations of electrical signals of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions. 1st International Congress on Fire in the Earth System: Humans and Nature, November 3-7, 2021, Valencia, Spain. Proceedings: 65-66. ISBN: 978-5-9807-7215-4
2. Zapata, R., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Luzuriaga, J. E., Mateo Pla, M. A., & Urchueguía, J. F. Evaluación de factores influyentes sobre las señales eléctricas en *Pinus halepensis*. 8^o Congreso Forestal Español: La ciencia forestal y su contribución a los objetivos de desarrollo sostenible. Lleida, España. Actas: 327. ISBN: 978-84-941695-6-4
3. Zapata, R., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Mateo Pla, M. A., Luzuriaga, J. E., Moreno Esteve J.C. Seasonal variations of electrical signals of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions. Workshop on Innovation on Information and Communication Technologies. ITACA-WIICT July 15th, 2022, Valencia, Spain. Proceedings: 39-58. ISBN 978-84-09-46075-5

10. BIBLIOGRAFÍA

- AAVV. Distribution Map of Aleppo Pine. EUFORGEN (2009). Disponible en: www.euforgen.org. Consultado: 16 junio de 2022.
- Abbott, D. T., & Crossley Jr, D. A. (1982). Woody litter decomposition following clear-cutting. *Ecology*, 63(1), 35-42.
- AEMET. Agencia Estatal de Meteorología (Niveles de Riesgo de Incendio del Sistema FWI) España. Disponible en: <https://prevencionincendiosgva.es/Meteorologia/InformesPrevisiones>. Consultado: 15 diciembre de 2021.
- Alario Franco, M. Á., Álvarez-Arenas Bayo, M., Díaz Pineda, F., Gascó Guerrero, G., Gascó Montes, J. M., Torres, P., & Sotelo Sancho, J. L. (2011). Los impactos del cambio climático en Europa: evaluación basada en indicadores. Informe conjunto de la AEMA, CCI y la OMS.
- Alexander, M. E., & Cruz, M. G. (2013). Corrigendum to: Assessing the effect of foliar moisture on the spread rate of crown fires. *International Journal of Wildland Fire*, 22(6), 869-870.
- Allard, G., Berrahmouni, N., Besacier, C., Boglio, D., Briens, M., Brizay, A., *et al.* (2013). State of forest resources in the Mediterranean Region. State of Mediterranean Forests. FAO: Rome, Italy.
- Almodóvar, J., Brotons, Ll., Carrillo-García, C., Carro, F., Cerdá, X., de la Cruz, A., *et al.* (2022). Los incendios en la Red Natura 2000: situación, prevención y propuestas
- Alonso Acosta, D. F., Leon Fariña, G. R. D., & Merlinski Weil, D. N. (2014). Adquisidor de actividad eléctrica del cerebro, señales de electroencefalograma (EEG).
- Alves, C. A., Gonçalves, C., Pio, C. A., Mirante, F., Caseiro, A., Tarelho, L., *et al.* (2010). Smoke emissions from biomass burning in a Mediterranean shrubland. *Atmospheric Environment*, 44(25), 3024-3033.
- Amblar, M. P., Casado Calle, M. J., Pastor Saavedra, M. A., Ramos Calzado, P., & Rodríguez Camino, E. (2017). Guía de escenarios regionalizados de cambio climático sobre España a partir de los resultados del IPCC-AR5.
- Amiro, B. D., Barr, A. G., Barr, J. G., Black, T. A., Bracho, R., Brown, M., *et al.* (2010). Ecosystem carbon dioxide fluxes after disturbance in forests of North America. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 115(G4).
- Analitis, A., Georgiadis, I., & Katsouyanni, K. (2012). Forest fires are associated with elevated mortality in a dense urban setting. *Occupational and environmental medicine*, 69(3), 158-162.

- Andreu, V., Imeson, A. C., & Rubio, J. L. (2001). Temporal changes in soil aggregates and water erosion after a wildfire in a Mediterranean pine forest. *Catena*, 44(1), 69-84.
- Arianoutsou, M., Beard, J. S., Ferrés, L., Folch, R., & Trabaud, L. V. (1993). La vida a les formacions escleròfil·les. *Mediterrànies* (Folch, R. coord.). Barcelona, Edit. MAB, UNESCO, 64-109.
- Armesto, J. J., & Martínez, J. A. (1978). Relations between vegetation structure and slope aspect in the mediterranean region of Chile. *The Journal of Ecology*, 881-889.
- Arroyo, M. T. K., Armesto, J. J., & Villagran, C. (1981). Plant phenological patterns in the high Andean Cordillera of central Chile. *The Journal of Ecology*, 205-223.
- Aso Poza U. (2019). Electrofisiología: qué es y cómo se investiga en ella. *Psicología y Mente*. Disponible en: <https://psicologiymente.com/neurociencias/electrofisiologia>. Consultado: 18 de diciembre de 2022.
- AVAMET. Asociación Valenciana de Meteorología 'Josep Peinado'. Disponible en: <https://www.avamet.org/mx-mxo.php?id=c11m902e01>. Consultado: 15 de diciembre de 2020.
- Awada, T., Radoglou, K., Fotelli, M. N., & Constantinidou, H. I. (2003). Ecophysiology of seedlings of three Mediterranean pine species in contrasting light regimes. *Tree Physiology*, 23(1), 33-41.
- Balaguer-Romano, R., Díaz-Sierra, R., Madrigal, J., Voltas, J., & Resco de Dios, V. (2020). Needle senescence affects fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) stands: A simulation study. *Forests*, 11(10), 1054.
- Barberá Riera, M. (2017). Exposición al humo de incendios forestales y mortalidad en Valencia (Doctoral dissertation, Universitat Jaume I).
- Barreto Galeano, J. P. (2014). Electroencefalograma. Comportamiento de Elección y Procesos de Decisión.
- Barrio, M., Loureiro, M. L., & Chas, M. L. (2007). Aproximación a las pérdidas económicas ocasionadas a corto plazo por los incendios forestales en Galicia en 2006. *Economía Agraria y Recursos Naturales-Agricultural and Resource Economics*, 45-64.
- Bede-Fazekas, Á., Horváth, L., & Kocsis, M. (2014). Impact of climate change on the potential distribution of Mediterranean pines. *Időjárás/Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service*, 118(1), 41-52.
- Belda-Palazón, B., Adamo, M., Valerio, C., Ferreira, L. J., Confraria, A., Reis-Barata, D., *et al.* (2020). A dual function of SnRK2 kinases in the regulation of SnRK1 and plant growth. *Nature Plants*, 6(11), 1345-1353.

- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, 15(4), 365-377.
- Beniston, M., Stephenson, D. B., Christensen, O. B., Ferro, A. T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T. & Woth, K. (2007): Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81: 71-95.
- Bhavishya, P. Y., Shalini, R., Suneetha, P. S. V. L., Nikitha, P. V. S., & Amulya, P. (2020). Short Circuit Indicator. *IJRAR-International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR)*, E-ISSN, 2348-1269.
- Blenkinsop, S. & Fowler, H. J. (2007): Changes in European drought characteristics projected by the PRUDENCE regional climate models. *International journal of climatology*, 27: 1595-1610.
- Bodí, M. B., Cerdà, A., Mataix-Solera, J., & Doerr, S. H. (2012). Efectos de los incendios forestales en la vegetación y el suelo en la cuenca mediterránea: revisión bibliográfica. *Boletín de la asociación de Geógrafos Españoles*.
- Bodí, M. B., Doerr, S. H., Mataix-Solera, J., & Cerdà, A. (2008). El papel del fuego en los ecosistemas terrestres. In V Congreso «La investigación ante la sociedad del conocimiento». *Sostenibilidad y Medio Ambiente* (pp. 331-335).
- Bodí, M. B., Muñoz-Santa, I., Armero, C., Doerr, S. H., Mataix-Solera, J., & Cerdà, A. (2013). Spatial and temporal variations of water repellency and probability of its occurrence in calcareous Mediterranean rangeland soils affected by fires. *Catena*, 108, 14-25.
- Boer, M. M., Nolan, R. H., Resco De Dios, V., Clarke, H., Price, O. F., & Bradstock, R. A. (2017). Changing weather extremes call for early warning of potential for catastrophic fire. *Earth's Future*, 5(12), 1196-1202.
- Boer, M. M., Resco de Dios, V., & Bradstock, R. A. (2020). Unprecedented burn area of Australian mega forest fires. *Nature Climate Change*, 10(3), 171-172.
- Boer, M. M., Sadler, R. J., Wittkuhn, R. S., McCaw, L., & Grierson, P. F. (2009). Long-term impacts of prescribed burning on regional extent and incidence of wildfires—Evidence from 50 years of active fire management in SW Australian forests. *Forest Ecology and Management*, 259(1), 132-142.
- Bogino, S. M., & Bravo, F. (2008). Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Annals of Forest Science*, 65(5), 506-506.
- Bond, W. J., & Keeley, J. E. (2005). Fire as a global 'herbivore': the ecology and evolution of flammable ecosystems. *Trends in ecology & evolution*, 20(7), 387-394.
- Bond, W. J., Woodward, F. I., & Midgley, G. F. (2005). The global distribution of ecosystems in a world without fire. *New phytologist*, 165(2), 525-538.

- Borghetti, M., Cinnirella, S., Magnani, F., & Saracino, A. (1998). Impact of long-term drought on xylem embolism and growth in *Pinus halepensis* Mill. *Trees*, 12(4), 187-195.
- Bose, J. C. (2011). *Nervous mechanism of plants*. Longmans, Green and Co., Calcutta. doi:10.5962/bhl.title.139322.
- Botequim, B., Garcia-Gonzalo, J., Marques, S., Ricardo, A., Borges, J. G., Tome, M., & Oliveira, M. M. (2013). Developing wildfire risk probability models for Eucalyptus globulus stands in Portugal. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 6(4), 217.
- Bradstock, R. A. (2010). A biogeographic model of fire regimes in Australia: current and future implications. *Global Ecology and Biogeography*, 19(2), 145-158.
- Brenner, E. D., Stahlberg, R., Mancuso, S., Vivanco, J., Baluška, F., & Van Volkenburgh, E. (2006). Plant neurobiology: an integrated view of plant signaling. *Trends in plant science*, 11(8), 413-419.
- Buhk, C., Meyn, A., & Jentsch, A. (2007). The challenge of plant regeneration after fire in the Mediterranean Basin: scientific gaps in our knowledge on plant strategies and evolution of traits. *Plant ecology*, 192(1), 1-19.
- Burdon-Sanderson, J. S. (1873). I. Note on the electrical phenomena which accompany irritation of the leaf of *Dionæa muscipula*. *Proceedings of the Royal Society of London*, 21(139-147), 495-496.
- Burgan, R. E., & Bradshaw, L. S. (1997). WFAS requires a variety of weather information. *Fire management notes (USA)*.
- Cabrera, H. (2002). Respuestas ecofisiológicas de plantas en ecosistemas de zonas con clima mediterráneo y ambientes de altamontaña. *Revista chilena de Historia natural*, 75(3), 625-637.
- Cailleret, M., Jansen, S., Robert, E. M., Desoto, L., Aakala, T., Antos, J. A., *et al.* (2017). A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Global change biology*, 23(4), 1675-1690.
- Cailleret, M., Nourtier, M., Amm, A., Durand-Gillmann, M., & Davi, H. (2014). Drought-induced decline and mortality of silver fir differ among three sites in Southern France. *Annals of Forest Science*, 71(6), 643-657.
- Camacho Crespo, A. H., Quezada Castro, A., & Morales Ledezma, I. A. (2016). Sistema de adquisición y tratamiento digital de las doce derivaciones cardiacas del electrocardiograma. *Journal Boliviano de Ciencias*, 12, 29.
- Campo, J., Andreu, V., Gimeno-García, E., González, O., & Rubio, J. L. (2006). Occurrence of soil erosion after repeated experimental fires in a Mediterranean environment. *Geomorphology*, 82(3-4), 376-387.
- Canadell, J., & Zedler, P. H. (1995). Underground structures of woody plants in Mediterranean ecosystems of Australia, California, and Chile. In *Ecology and biogeography of Mediterranean ecosystems in Chile, California, and Australia* (pp. 177-210). Springer, New York, NY.

- Caon, L., Vallejo, V. R., Ritsema, C. J., & Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 139, 47-58.
- Capps, S. B., Zhuang, W., Liu, R., Rolinski, T., & Qu, X. (2021). Modelling chamise fuel moisture content across California: a machine learning approach. *International Journal of Wildland Fire*, 31(2), 136-148.
- Cardoso, S. S., Carrondo, L. B., Marques, J. M., Narciso, P. N., Rocha, M. J., Rodrigues, I. N., & Soares, A. (2004). Monitorization of the electrical signal generated by a tree. February 2004–4th luso-spanish assembly on geodesy and geophysics.
- Carnicer, J., Coll, M., Ninyerola, M., Pons, X. Sánchez, G., Peñuelas, J. (2011): Widespread crown condition decline, food web disruption, and amplified tree mortality with increased climate change-typedrought. *Proceedings National Academy of Sciences*, 108: 1474-1478.
- Carrière, S. D., Ruffault, J., Pimont, F., Doussan, C., Simioni, G., Chalikakis, K., *et al.* (2020). Impact of local soil and subsoil conditions on inter-individual variations in tree responses to drought: insights from Electrical Resistivity Tomography. *Science of the Total Environment*, 698, 134247.
- Carrión, J. S., Munuera, M., Dupré, M., & Andrade, A. (2001). Abrupt vegetation changes in the Segura Mountains of southern Spain throughout the Holocene. *Journal of Ecology*, 783-797.
- Carrión, J.S., Navarro, C. (2002). Cryptogam spores and other non-pollen microfossils as sources of palaeoecological information: case-studies from Spain. In *Annales Botanici Fennici* (pp. 1-14): Finnish Zoological and Botanical Publishing Board.
- Carvalho, A. C., Carvalho, A., Martins, H., Marques, C., Rocha, A., Borrego, C., *et al.* (2011). Fire weather risk assessment under climate change using a dynamical downscaling approach. *Environmental Modelling & Software*, 26(9), 1123-1133.
- Castagneri, D., Fonti, P., von Arx, G., & Carrer, M. (2017). How does climate influence xylem morphogenesis over the growing season? Insights from long-term intra-ring anatomy in *Picea abies*. *Annals of botany*, 119(6), 1011-1020.
- Castellnou, M., Guiomar, N., Rego, F., & Fernandes, P. M. (2018). Fire growth patterns in the 2017 mega fire episode of October 15, central Portugal. *Advances in forest fire research*, 447-453.
- Castillo, M., Pedernera, P., & Pena, E. (2003). Incendios forestales y medio ambiente: una síntesis global. *Revista Ambiente y Desarrollo*, 9(3), 44-53.
- Castro, A. C. M., Carvalho, J. P., & Meixedo, J. P. (2012). A qualitative description of soil parameters variation due to a prescribed fire in Portuguese northwestern forests using Fuzzy Boolean Nets—The case study of Cabreira mountain. *Geoderma*, 191, 89-96.

- Castro, F. X., Tudela, A., & Sebastià, M. T. (2003). Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). *Agricultural and Forest Meteorology*, 116(1-2), 49-59.
- Castro, F. X., Tudela, A., Gabriel, E., Montserrat, D., Canyameres, E., & Segarra, M. (2006). Evolution of live fuel moisture in Mediterranean forest. *Forest Ecology and Management*, (234), S34.
- Catto, J. L., Ackerley, D., Booth, J. F., Champion, A. J., Colle, B. A., Pfahl, S., *et al.* (2019). The future of midlatitude cyclones. *Current Climate Change Reports*, 5, 407-420.
- Chas-Amil, M. L., Touza, J. M., Prestemon, J. P., & McClean, C. J. (2012). Natural and social factors influencing forest fire occurrence at a local spatial scale. In: Spano, Donatella; Bacciu, Valentina; Salis, Michele; Sirca, Costantino (eds.). *Modelling Fire Behavior and Risk*. Global Fire Monitoring Center: Freiburg, Germany, 181-186., 181-186.
- Chiriaco, M. V., Perugini, L., Cimini, D., D'Amato, E., Valentini, R., Bovio, G., *et al.* (2013). Comparison of approaches for reporting forest fire-related biomass loss and greenhouse gas emissions in southern Europe. *International Journal of Wildland Fire*, 22(6), 730-738.
- Chomel, M., Fernandez, C., Bousquet-Mélou, A., Gers, C., Monnier, Y., Santonja, M., *et al.* (2014). Secondary metabolites of *Pinus halepensis* alter decomposer organisms and litter decomposition during afforestation of abandoned agricultural zones. *Journal of Ecology*, 102(2), 411-424.
- Chou, M. D., & Suarez, M. J. (1999). A solar radiation parameterization (CLIRAD-SW) developed at Goddard Climate and Radiation Branch for Atmospheric Studies. NASA Technical Memorandum NASA/TM-1999-104606, 15, 48.
- Christensen, J. H., Hewitson, B., Busuioc, A., Chen, A., Gao, X., Held, I., *et al.* (2007). Regional Climate Projections. In: *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. In: Solomon,
- Chuvieco, E., Aguado, I., & Dimitrakopoulos, A. P. (2004). Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Canadian Journal of Forest Research*, 34(11), 2284-2293.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Jurdao, S., Pettinari, M. L., Yebra, M., Salas, J., *et al.* (2012). Integrating geospatial information into fire risk assessment. *International journal of wildland fire*, 23(5), 606-619.
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M. P., *et al.* (2010). Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221(1), 46-58.

- Chuvieco, E., Allgöwer, B., & Salas, J. (2003). Integration of physical and human factors in fire danger assessment. In *Wildland fire danger estimation and mapping: The role of remote sensing data* (pp. 197-218).
- CAMS. Copernicus Atmosphere Monitoring Service (2021). Wildfires wreaked havoc in 2021, CAMS tracked their impact. Disponible en: <https://atmosphere.copernicus.eu/wildfires-wreaked-havoc-2021-cams-tracked-their-impact>. Consultado: 13 de enero de 2023.
- Cordova Roca, S., & Jauregui Tapia, P. (1995). Fundamentos de electrocardiografía clínica. In *Fundamentos de electrocardiografía clínica* (pp. 211-211).
- Corona, P., Ascoli, D., Barbati, A., Bovio, G., Colangelo, G., Elia, M., *et al.* (2015). Integrated forest management to prevent wildfires under Mediterranean environments.
- Costa-Saura, J. M., Balaguer-Beser, Á., Ruiz, L. A., Pardo-Pascual, J. E., & Soriano-Sancho, J. L. (2021). Empirical models for spatio-temporal live fuel moisture content estimation in mixed mediterranean vegetation areas using sentinel-2 indices and meteorological data. *Remote Sensing*, 13(18), 3726.
- Countryman, C. M. (1979). Measuring moisture content in living chaparral: a field user's manual (Vol. 36). US Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station.
- Cramer, W., Guiot, J., Fader, M., Garrabou, J., Gattuso, J. P., Iglesias, A., *et al.* (2018). Climate change and interconnected risks to sustainable development in the Mediterranean. *Nature Climate Change*, 8(11), 972-980.
- Crockett, J. L., & Westerling, A. L. (2018). Greater temperature and precipitation extremes intensify Western US droughts, wildfire severity, and Sierra Nevada tree mortality. *Journal of Climate*, 31(1), 341-354.
- Dahanayake, K. C., & Chow, C. L. (2018). Moisture content, ignitability, and fire risk of vegetation in vertical greenery systems. *Fire Ecology*, 14(1), 125-142.
- Danson, F. M., & Bowyer, P. (2004). Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. *Remote Sensing of Environment*, 92(3), 309-321.
- Darwin, C. (1875). *Insectivorous plants*. D Appleton & Company: New York. Doi: 10.5962/bhl.title.99933.
- Datta, P., & Palit, P. (2004). Relationship between environmental factors and diurnal variation of bioelectric potentials of an intact jute plant. *Current Science*, 680-683.
- de Dios, R., & Rinaudo. (2020). *Plant-fire interactions*. Springer International Publishing. Springer: Cham, Switzerland, 2020; ISBN 9783030411916.
- de Dios, V. R., Fellows, A. W., Nolan, R. H., Boer, M. M., Bradstock, R. A., Domingo, F., & Goulden, M. L. (2015). A semi-mechanistic model for predicting the moisture content of fine litter. *Agricultural and Forest Meteorology*, 203, 64-73.

- de Dios, V. R., Hedo, J., Camprubí, À. C., Thapa, P., Del Castillo, E. M., de Aragón, J. M., *et al.* (2021). Climate change induced declines in fuel moisture may turn currently fire-free Pyrenean mountain forests into fire-prone ecosystems. *Science of The Total Environment*, 797, 149104.
- de las Heras, J., Moya, D., Vega, J. A., Daskalidou, E., Vallejo, V. R., Grigoriadis, N., *et al.* (2012). Post-fire management of serotinous pine forests. *Post-fire management and restoration of southern European forests*, 121-150.
- de Luis, M., Čufar, K., Di Filippo, A., Novak, K., Papadopoulos, A., Piovesan, G., *et al.* (2013). Plasticity in dendroclimatic response across the distribution range of Aleppo pine (*Pinus halepensis*). *PloS one*, 8(12), e83550.
- de Rigo, D., Libertà, G., Durrant, T. H., Vivancos, T. A., & San-Miguel-Ayanz, J. (2017). *Forest fire danger extremes in Europe under climate change: variability and uncertainty* (Doctoral dissertation, Publications Office of the European Union).
- del Campo, A. D., González-Sanchis, M., Lidón, A., Ceacero, C. J., & García-Prats, A. (2018). Rainfall partitioning after thinning in two low-biomass semiarid forests: Impact of meteorological variables and forest structure on the effectiveness of water-oriented treatments. *Journal of hydrology*, 565, 74-86.
- del Campo, A. D., González-Sanchis, M., Lidón, A., García-Prats, A., Lull, C., Bautista, I., *et al.* (2017). Ecohydrological-based forest management in semi-arid climate. *Ecosystem services of headwater catchments*, 45-57.
- del Campo, A. D., González-Sanchis, M., Molina, A. J., Garcia-Prats, A., Ceacero, C. J., & Bautista, I. (2019). Effectiveness of water-oriented thinning in two semiarid forests: The redistribution of increased net rainfall into soil water, drainage and runoff. *Forest Ecology and Management*, 438, 163-175.
- del Campo, A. D., Segura-Orenga, G., Ceacero, C. J., González-Sanchis, M., Molina, A. J., Reyna, S., & Hermoso, J. (2020). Reforesting drylands under novel climates with extreme drought filters: The importance of trait-based species selection. *Forest Ecology and Management*, 467, 118156.
- Delgado, Á. V., González-Caballero, F., Hunter, R. J., Koopal, L. K., & Lyklema, J. (2007). Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena. *Journal of colloid and interface science*, 309(2), 194-224.
- Delgado-Artés, R., Garófano-Gómez, V., Oliver-Villanueva, J. V., & Rojas-Briales, E. (2022). Land use/cover change analysis in the Mediterranean region: a regional case study of forest evolution in Castelló (Spain) over 50 years. *Land Use Policy*, 114, 105967.
- Dennison, P. E., & Moritz, M. A. (2009). Critical live fuel moisture in chaparral ecosystems: a threshold for fire activity and its relationship to antecedent precipitation. *International Journal of Wildland Fire*, 18(8), 1021-1027.

- Dimitrakopoulos, A. P., & Bemmerzouk, A. M. (2003). Predicting live herbaceous moisture content from a seasonal drought index. *International Journal of Biometeorology*, 47(2), 73-79.
- Dimitrakopoulos, A. P., Bemmerzouk, A. M., & Mitsopoulos, I. D. (2011). Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorological Applications*, 18(1), 83-93.
- Directive 1999/5/EC of The European Parliament and of The Council of 9 March 1999.
- Dix, B., Roffael, E., Becker, G., & Gruss, K. (1992). Properties of pulps prepared from poplar wood of different clones, sites and ages. *Papier*.
- Doerr, S. H., Shakesby, R. A., & MacDonald, L. H. (2009). Soil water repellency: a key factor in post-fire erosion. In *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 213-240). CRC Press.
- Dokas, I., Statheropoulos, M., & Karma, S. (2007). Integration of field chemical data in initial risk assessment of forest fire smoke. *Science of the total environment*, 376(1-3), 72-85.
- Donovan, L., Linton, M., & Richards, J. (2001). Predawn plant water potential does not necessarily equilibrate with soil water potential under well-watered conditions. *Oecologia*, 129(3), 328-335.
- Dorado Liñán, I., Gutiérrez, E., Heinrich, I., Andreu-Hayles, L., Muntán, E., Campelo, F., & Helle, G. (2012). Age effects and climate response in trees: a multi-proxy tree-ring test in old-growth life stages. *European Journal of Forest Research*, 131(4), 933-944.
- Ekberg, I., Eriksson, G., & Dormling, I. (1979). Photoperiodic reactions in conifer species. *Ecography*, 2(4), 255-263.
- EPDATA (2023). Agencia de Datos - editado por Europa Press disponible en: <https://www.epdata.es/> Consultado: 08 de marzo de 2023.
- Esteve, M. A., Martínez, J., Hernández, I., Robledano, F., Pérez, M. A., & Lloret, F. (2015). Cambio climático y biodiversidad en el contexto de la Región de Murcia. *Cambio climático en la Región de Murcia. Evaluación basada en indicadores* (Victoria F, coord.). Murcia: Oficina de Impulso Socioeconómico del Medio Ambiente, 105-132.
- European Commission, S.-G. COM/2019/640 Final the European Green Deal. *Eur. Comm.* 2019, 53, 24.
- European Commission. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions New EU Forest Strategy for 2030; COM/2021/572 Final; European Commission: Brussels, Belgium, 2021.

- European Committee of the Regions; EU Forest Strategy for 2030, (2022/C 301/11) Official Journal of the European Union OJ C 301, 5.8.2022, p. 61–69; European Commission: Brussels, Belgium, 2022.
- European Parliament resolution of 13 September 2022 on a new EU Forest Strategy for 2030 – Sustainable Forest Management in Europe (2022/2016(INI)).
- European Parliament. Regulation (Eu) 2018/841 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 on the Inclusion of Greenhouse Gas Emissions and Removals from Land Use, Land Use Change and Forestry in the 2030 Climate and Energy Framework and Amending Regulation (EU) No 525/2013 and Decision No 529/2013/EU; European Parliament: Strasbourg, France, 2018.
- European Parliament; European Council. Decision No 529/2013/EU of 21 May 2013 on Accounting Rules on Greenhouse Gas Emissions and Removals Resulting from Activities Relating to Land Use, Land-Use Change and Forestry and on Information Concerning Actions Relating to Those Activities; European Parliament: Strasbourg, France, 2013.
- Quintela F. R., & Redondo Melchor R. C. Diccionario de Ingeniería Eléctrica. Universidad de Salamanca. Disponible en: <https://electricidad.usal.es/Diccionario>. Consultado: 02 de marzo de 2023.
- Fady, B., Semerci, H., & Vendramin, G. G. (2003). EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for Aleppo pine (*Pinus halepensis*) and Brutia pine (*Pinus brutia*). Bioersivity International.
- Faraway, J. J. (2016). Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models. Chapman and Hall/CRC.
- Farjon, A. (2010). A Handbook of the World's Conifers. Brill. Leiden, The Netherlands.
- Faustini, A., Alessandrini, E. R., Pey, J., Perez, N., Samoli, E., Querol, X., *et al.* (2015). Short-term effects of particulate matter on mortality during forest fires in Southern Europe: results of the MED-PARTICLES Project. Occupational and environmental medicine, 72(5), 323-329.
- Fensom, D. S. (1963). The bioelectric potentials of plants and their functional significance: V. Some daily and seasonal changes in the electrical potential and resistance of living trees. Canadian Journal of Botany, 41(6), 831-851.
- Fernández Fernández, J., Casanueva, A., Montávez, J. P., Gaertner, M. Á., Casado Calle, M. J., Manzanas, R., & Gutiérrez Llorente, J. M. (2017). Regional climate projections over Spain: atmosphere. Future climate projections.
- Fernández, J. M., Barbancho, A. C., & Ugidos, M. L. (2001). La sequía edáfica en la cuenca del Duero. Ecosistemas, 10(3).
- Ferreira Gómez, A. (2016). Análisis socioeconómico de los incendios forestales españoles y propuesta de rediseño de la estrategia de prevención-concienciación.
- Field, A. (2013). Discovering statistics using IBM SPSS statistics. sage.

- Finney, M. A. (2005). The challenge of quantitative risk analysis for wildland fire. *Forest ecology and management*, 211(1-2), 97-108.
- Fotelli, M. N., Korakaki, E., Paparrizos, S. A., Radoglou, K., Awada, T., & Matzarakis, A. (2019). Environmental controls on the seasonal variation in gas exchange and water balance in a near-coastal Mediterranean *Pinus halepensis* forest. *Forests*, 10(4), 313.
- Francis, J. A., & Vavrus, S. J. (2012). Evidence linking Arctic amplification to extreme weather in mid-latitudes. *Geophysical research letters*, 39(6).
- Fromm, J., & Lautner, S. (2007). Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant, cell & environment*, 30(3), 249-257.
- Fuster, J. C. (1996). Distribucion potencial del bosque y de sus especies arboreas en zonas mediterraneas semiaridas: modelos y aplicaciones (Doctoral dissertation, Universidad de Murcia).
- Gale, M. G., Cary, G. J., Van Dijk, A. I., & Yebra, M. (2021). Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour. *Remote Sensing of Environment*, 255, 112282.
- Garay Moena, R., Castillo, M., Tapia, R., & Vergara, J. (2019). Territorio, viviendas y áreas de incendios forestales de interfaz: Localidades periurbanas en torno al Gran Santiago, Chile. In XI Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, Barcelona-Santiago de Chile, Junio 2019. Departament d'Urbanisme i Ordenació del Territori. Universitat Politècnica de Catalunya.
- García, C. C., & Cutillas, P. P. (Eds.). (2017). Los riesgos ambientales en la región de Murcia. Universidad de Murcia.
- Gelli, A., Higgins, V. J., & Blumwald, E. (1997). Activation of plant plasma membrane Ca²⁺-permeable channels by race-specific fungal elicitors. *Plant Physiology*, 113(1), 269-279.
- Gibert, D., Le Mouël, J. L., Lambs, L., Nicollin, F., & Perrier, F. (2006). Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk. *Plant Science*, 171(5), 572-584.
- Gil, P. M., Gurovich, L., & Schaffer, B. (2008). The electrical response of fruit trees to soil water availability and diurnal light-dark cycles. *Plant signaling & behavior*, 3(11), 1026-1029.
- Gil, P. M., Gurovich, L., Schaffer, B., García, N., & Iturriaga, R. (2009). Electrical signaling, stomatal conductance, ABA and ethylene content in avocado trees in response to root hypoxia. *Plant Signaling & Behavior*, 4(2), 100-108.
- Giliberto, J., & Estay, H. (1978). Seasonal water stress in some Chilean matorral shrubs. *Botanical Gazette*, 139(2), 236-240.
- Gimeno, T. E., Pias, B., Lemos-Filho, J. P., & Valladares, F. (2009). Plasticity and stress tolerance override local adaptation in the responses of Mediterranean holm oak seedlings to drought and cold. *Tree Physiology*, 29(1), 87-98.

- Gimeno-García, E., Andreu, V., & Rubio, J. L. (2000). Changes in organic matter, nitrogen, phosphorus and cations in soil as a result of fire and water erosion in a Mediterranean landscape. *European journal of soil science*, 51(2), 201-210.
- Gimeno-García, E., Andreu, V., & Rubio, J. L. (2007). Influence of vegetation recovery on water erosion at short and medium-term after experimental fires in a Mediterranean shrubland. *Catena*, 69(2), 150-160.
- Gindl, W., Loppert, H. G., & Wimmer, R. (1999). Relationship between streaming potential and sap velocity in *Salix Alba* L. *PHYTON-HORN-*, 39(2), 217-224.
- Giorgi, F. (2006). Climate change hot-spots. *Geophysical research letters*, 33(8).
- Giovannini, G., Vallejo, R., Lucchesi, S., Bautista, S., Ciompi, S., & Llovet, J. (2001). Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean conditions. *Forest Ecology and Management*, 147(1), 15-23.
- Gobierno de Canarias. (2021). Nota de prensa 29 de julio de 2021, Viceconsejería de Comunicación y Relaciones con los Medios, Dirección General de Comunicación. Gobierno de Canarias.
- Gobierno de Navarra. (2019) Agenda Forestal de Navarra 2019-2023. Dirección General de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Gobierno de Navarra.
- González-Pelayo, O., Andreu, V., Campo, J., Gimeno-García, E., & Rubio, J. L. (2006). Hydrological properties of a Mediterranean soil burned with different fire intensities. *Catena*, 68(2-3), 186-193.
- González-Pelayo, O., Andreu, V., Gimeno-García, E., Campo, J., & Rubio, J. L. (2010). Effects of fire and vegetation cover on hydrological characteristics of a Mediterranean shrubland soil. *Hydrological Processes: An International Journal*, 24(11), 1504-1513.
- Gora, E. M., & Yanoviak, S. P. (2015). Electrical properties of temperate forest trees: a review and quantitative comparison with vines. *Canadian Journal of Forest Research*, 45(3), 236-245.
- Gracia, C. A., Sabaté, S., & Sánchez, A. (2002). El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo. *Ecosistemas*, 11(2).
- Grave-de Peralta, R., González-Andino, S., & Gómez-González, C. M. (2004). Bases biofísicas de la localización de los generadores cerebrales del electroencefalograma. Aplicación de un modelo de tipo distribuido a la localización de focos epilépticos. *Rev neurol*, 39(8), 748-756.
- Guillen-Climent, M. L., Mas, H., Fernández-Landa, A., Algeet-Abarquero, N., & Tomé, J. L. (2020). Using hipersepctral images for decay detection in *Pinus halepensis* (Mill.) in the Mediterranean forest. *Revista de Teledetección*, 55, 59-69.
- Gurovich, L. A., & Hermosilla, P. (2009). Electric signalling in fruit trees in response to water applications and light–darkness conditions. *Journal of plant physiology*, 166(3), 290-300.

- GVA 2019, Consell de la Generalitat Valenciana; Declaración institucional de emergencia climática aprobada por el Consell de la Generalitat Valenciana el 6 de septiembre de 2019.
- GVA 2022, LLEI 6/2022, de 5 de diciembre, de la Generalitat, del canvi climàtic i la transició ecològica de la Comunitat Valenciana. [2022/11735]
- Haikerwal, A., Akram, M., Del Monaco, A., Smith, K., Sim, M. R., Meyer, M., *et al.* (2015). Impact of fine particulate matter (PM 2.5) exposure during wildfires on cardiovascular health outcomes. *Journal of the American Heart Association*, 4(7), e001653.
- Hänninen, O. O., Salonen, R. O., Koistinen, K., Lanki, T., Barregard, L., & Jantunen, M. (2009). Population exposure to fine particles and estimated excess mortality in Finland from an East European wildfire episode. *Journal of exposure science & environmental epidemiology*, 19(4), 414-422.
- Hao, Z., Li, W., & Hao, X. (2021). Variations of electric potential in the xylem of tree trunks associated with water content rhythms. *Journal of Experimental Botany*, 72(4), 1321-1335.
- Hapla, F., & Saborowski, J. (1987). Planning of sample size for wood anatomical investigations. *Holz als Roh-und Werkstoff* (Germany, FR).
- Hapla, F., Oliver-Villanueva, J. V., & González-Molina, J. M. (2000). Effect of silvicultural management on wood quality and timber utilisation of *Cedrus atlantica* in the European Mediterranean area. *Holz als Roh-und Werkstoff*, 58(1), 1-8.
- Harmony, T. (1990). Origen del electroencefalograma. *Salud mental*, 13(3), 27-34.
- Hernández, L. & cols. (2021). Paisajes cortafuegos. Propuesta de WWF España y ANP|WWF Portugal para adaptar el territorio ibérico a los incendios. WWF España y ANP|WWF.
- Hernández, L. & cols. (2022). Pastoreo contra incendios. Propuesta de WWF España para adaptar el territorio al cambio climático. WWF España.
- Hernández, O. G. (2022). Tendencias recientes del NDVI en Andalucía: los límites del reverdecimiento. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (94), 1.
- Hernando, F. M., Cascos, C., De Celis, A. J. G., & Rodríguez, E. B. (2008). Dinámica de los incendios forestales en Castilla y León. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*.
- Herrera, S. et al. (2018) Proyecciones regionales de Cambio Climático para vientos extremos en España para el s.XXI: Caracterización de valores de retorno y frecuencia de configuraciones atmosféricas de peligro. Informe Final. Grupo de Meteorología de Santander. Departamento de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación, MACC-UC.; 31 pp.
- Hódar, J. A., Zamora, R., & Cayuela, L. (2012). Cambio climático y plagas: algo más que el clima. *Ecosistemas*, 21(3), 73-78.

- Hódar, J. A., Zamora, R., & Cayuela, L. (2012). Climate change and the incidence of a forest pest in Mediterranean ecosystems: can the North Atlantic Oscillation be used as a predictor?. *Climatic Change*, 113(3), 699-711.
- Hoerling, M., Eischeid, J., Perlwitz, J., Quan, X., Zhang, T., & Pegion, P. (2012). On the increased frequency of Mediterranean drought. *Journal of climate*, 25(6), 2146-2161.
- Hoinka, K. P., Carvalho, A., & Miranda, A. I. (2009). Regional-scale weather patterns and wildland fires in central Portugal. *International Journal of Wildland Fire*, 18(1), 36-49.
- Holden, Z. A., & Jolly, W. M. (2011). Modeling topographic influences on fuel moisture and fire danger in complex terrain to improve wildland fire management decision support. *Forest Ecology and Management*, 262(12), 2133-2141.
- Holden, Z. A., Swanson, A., Luce, C. H., Jolly, W. M., Maneta, M., Oyler, J. W., *et al.* (2018). Decreasing fire season precipitation increased recent western US forest wildfire activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(36), E8349-E8357.
- Horwitz, W. (1939). The theory of electrokinetic phenomena. *Journal of Chemical Education*, 16(11), 519.
- IFN3. Tercer Inventario Forestal Nacional (3rd National Forest Inventory of Spain); Ministerio para la Transformación Ecológica y el Reto Demográfico: Madrid, Spain, 2007.
- Jain, P., Coogan, S. C., Subramanian, S. G., Crowley, M., Taylor, S., & Flannigan, M. D. (2020). A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environmental Reviews*, 28(4), 478-505.
- Jayachandran, S. (2009). Air quality and early-life mortality evidence from Indonesia's wildfires. *Journal of Human resources*, 44(4), 916-954.
- Jenkins, K. L. (2012). Modelling the economic and social consequences of drought under future projections of climate change (Doctoral dissertation, University of Cambridge).
- Jenkins, M. J., Page, W. G., Hebertson, E. G., & Alexander, M. E. (2012). Fuels and fire behavior dynamics in bark beetle-attacked forests in Western North America and implications for fire management. *Forest Ecology and Management*, 275, 23-34.
- Jiménez D, (2006). ¿Cuánto vale un bosque que se quema? EL MUNDO | Suplemento natura 8 de Julio de 2006, número 5. Disponible en: <https://www.elmundo.es/suplementos/natura/2006/5/1152183887.html>
Consultado: 05 de marzo de 2022
- Johnston, F. H., Henderson, S. B., Chen, Y., Randerson, J. T., Marlier, M., DeFries, R. S., *et al.* (2012). Estimated global mortality attributable to smoke from landscape fires. *Environmental health perspectives*, 120(5), 695-701.

- Jolly, W. M., & Johnson, D. M. (2018). Pyro-ecophysiology: shifting the paradigm of live wildland fuel research. *Fire*, 1(1), 8.
- Jurdao, S., Chuvieco, E., & Arevalillo, J. M. (2012). Modelling fire ignition probability from satellite estimates of live fuel moisture content. *Fire Ecology*, 8(1), 77-97.
- Karali, A., Hatzaki, M., Giannakopoulos, C., Roussos, A., Xanthopoulos, G., & Tenentes, V. (2014). Sensitivity and evaluation of current fire risk and future projections due to climate change: the case study of Greece. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(1), 143-153.
- Karavani, A., Boer, M. M., Baudena, M., Colinas, C., Díaz-Sierra, R., Pemán, J., *et al.* (2018). Fire-induced deforestation in drought-prone Mediterranean forests: drivers and unknowns from leaves to communities. *Ecological Monographs*, 88(2), 141-169.
- Käse, H. (1969). Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern (No. 94). Akademie-Verlag.
- Keane, R. E. (2015). *Wildland fuel fundamentals and applications* (No. 11904). Cham, Switzerland: Springer International Publishing.
- Keetch, J. J., & Byram, G. M. (1968). A drought index for forest fire control (Vol. 38). US Department of Agriculture, Forest Service, Southeastern Forest Experiment Station.
- Kelly, A. E., & Goulden, M. L. (2016). A montane Mediterranean climate supports year-round photosynthesis and high forest biomass. *Tree physiology*, 36(4), 459-468.
- Kenny, T. (2008). *The nuts and bolts of cardiac pacing* (Vol. 1). John Wiley & Sons.
- Klein, T., Cohen, S., & Yakir, D. (2011). Hydraulic adjustments underlying drought resistance of *Pinus halepensis*. *Tree physiology*, 31(6), 637-648.
- Klein, T., Cohen, S., Paudel, I., Preisler, Y., Rotenberg, E., & Yakir, D. (2016). Diurnal dynamics of water transport, storage and hydraulic conductivity in pine trees under seasonal drought. *iForest-Biogeosciences and Forestry*, 9(5), 710.
- Koppan, A. (2004). Variations of the natural electric potential differences occurring on tree trunks and their relationship with the xylem sap flow. PhD Thesis. University of West Hungary. Sopron
- Koppán, A., Fenyvesi, A., Szarka, L., & Wesztergom, V. (2002). Measurement of electric potential difference on trees. *Acta Biologica Szegediensis*, 46(3-4), 37-38.
- Koppán, A., Szarka, L., & Wesztergom, V. (1999). Temporal variation of electrical signal recorded in a standing tree. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica*, 34(1-2), 169-180.
- Koppán, A., Szarka, L., & Wesztergom, V. (2000). Annual fluctuation in amplitudes of daily variations of electrical signals measured in the trunk of a standing

tree. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de la Vie*, 323(6), 559-563.

- Korol, L., Madmony, A., Riov, Y., & Schiller, G. (1995). *Pinus halepensis* × *Pinus brutia* subsp. *brutia* hybrids? Identification using morphological and biochemical traits. *Silvae genetica*, 44(4), 186-190.
- Krause, A., Kloster, S., Wilkenskjeld, S., & Paeth, H. (2014). The sensitivity of global wildfires to simulated past, present, and future lightning frequency. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 119(3), 312-322.
- Krcmar, P., Kuritka, I., Maslik, J., Urbanek, P., Bazant, P., Machovsky, M., *et al.* (2019). Fully inkjet-printed cuo sensor on flexible polymer substrate for alcohol vapours and humidity sensing at room temperature. *Sensors*, 19(14), 3068.
- Lamb, H. H., & Gray, B. M. (1978). *Tree rings and climate*. By HC Fritts. London, New York and San Francisco, Academic Press. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 104(439), 236-237.
- Larsen, I. J., MacDonald, L. H., Brown, E., Rough, D., Welsh, M. J., Pietraszek, J. H., *et al.* (2007). What Causes Runoff and Sediment Yields to Increase After Wildfires?. In *AGU Fall Meeting Abstracts* (Vol. 2007, pp. H43F-1693).
- Lasanta-Martínez, T., Vicente-Serrano, S. M., & Cuadrat-Prats, J. M. (2005). Mountain Mediterranean landscape evolution caused by the abandonment of traditional primary activities: a study of the Spanish Central Pyrenees. *Applied Geography*, 25(1), 47-65.
- Le Mouëll, J. L., Gibert, D., & Poirier, J. P. (2010). On transient electric potential variations in a standing tree and atmospheric electricity. *Comptes Rendus Geoscience*, 342(2), 95-99.
- Lebourgeois, F., & Becker, M. (1996). Dendroécologie du pin laricio de Corse dans l'Ouest de la France. Evolution du potentiel de croissance au cours des dernières décennies. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 53, No. 5, pp. 931-946). EDP Sciences.
- Lecina-Diaz, J., Martínez-Vilalta, J., Alvarez, A., Vayreda, J., & Retana, J. (2021). Assessing the Risk of Losing Forest Ecosystem Services Due to Wildfires. *Ecosystems*, 24(7), 1687-1701.
- Lerma-Arce, V., Yagüe-Hurtado, C., Van den Berg, H., García-Folgado, M., Oliver-Villanueva, J. V., Benhalima, Y., *et al.* (2022). Development of a Model to Estimate the Risk of Emission of Greenhouse Gases from Forest Fires. *Fire*, 6(1), 8.
- Lévy, Élie (2004). *Diccionario de física*. Ediciones AKAL. ISBN 978-84-460-1255-9.
- Lindgren, A., & Jansson, S. (1995). *Fisiología Cardíaca y estimulación*. Pacemaker AB.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., Garcia-Gonzalo, J., *et al.* (2010): Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest ecology and management*, 259(4): 698-709.

- Littell, J. S., Peterson, D. L., Riley, K. L., Liu, Y., & Luce, C. H. (2016). A review of the relationships between drought and forest fire in the United States. *Global change biology*, 22(7), 2353-2369.
- Liu, J. C., Pereira, G., Uhl, S. A., Bravo, M. A., & Bell, M. L. (2015). A systematic review of the physical health impacts from non-occupational exposure to wildfire smoke. *Environmental research*, 136, 120-132.
- Lloret, F. & Zedler, P. H. (2009). The effect of forest fire on vegetation», en *Fire effects on Soils and Restoration Strategies* (Cerdà, A. y Robichaud, P. R., coord.). Enfield, Edit. Science Publishers, 257-295.
- López de Heredia, U., Carrión, J. S., Jiménez, P., Collada, C., & Gil, L. (2007). Molecular and palaeoecological evidence for multiple glacial refugia for evergreen oaks on the Iberian Peninsula. *Journal of Biogeography*, 34(9), 1505-1517.
- Loustau, D., Granier, A., Moussa, F. E. H., Sartore, M., & Guedon, M. (1990). Evolution saisonnière du flux de sève dans un peuplement de pins maritimes. In *Annales des sciences forestières* (Vol. 47, No. 6, pp. 599-618). EDP Sciences.
- Love, C. J., Zhang, S., & Mershin, A. (2008). Source of sustained voltage difference between the xylem of a potted *Ficus benjamina* tree and its soil. *PloS one*, 3(8), e2963.
- Lucas-Borja, M. E., Zema, D. A., Fernández, C., Soria, R., Miralles, I., Santana, V. M., et al. (2022). Limited contribution of post-fire eco-engineering techniques to support post-fire plant diversity.
- Lung, T., Lavalle, C., Hiederer, R., Dosio, A., & Bouwer, L. M. (2013). A multi-hazard regional level impact assessment for Europe combining indicators of climatic and non-climatic change. *Global Environmental Change*, 23(2), 522-536.
- Madrigal, J., Hernando, C., & Guijarro, M. (2013). A new bench-scale methodology for evaluating the flammability of live forest fuels. *Journal of fire sciences*, 31(2), 131-142.
- Maestre, F. T., Cortina, J., Bautista, S., & Bellot, J. (2003). Does *Pinus halepensis* facilitate the establishment of shrubs in Mediterranean semi-arid afforestations?. *Forest Ecology and Management*, 176(1-3), 147-160.
- Martín León, F. (2019). Los inviernos serán más cálidos, pero también con irrupciones más frías, en *Revista del Aficionado a la Meteorología*, febrero. Disponible en: <https://www.tiempo.com/ram/507091/losinviernos-seran-mas-calidos-pero-tambien-conirrupciones-mas-frias/>. Consultado: 05 de marzo de 2022.
- Martínez, E., & Martínez Chamorro, E. (1996). Repercusión de los incendios forestales en la economía local. Pérdidas en valores paisajísticos, recreativos y costes sociales. *Montes*, 43, 41-44.

- Martínez, J. A., & Armesto, J. J. (1983). Ecophysiological plasticity and habitat distribution in three evergreen sclerophyllous shrubs of the Chilean matorral. *Acta oecologica. Série Oecologia plantarum Montreuil*, 4(3), 211-219.
- Martínez, J., Vega-García, C., & Chuvieco, E. (2009). Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in Spain. *Journal of environmental management*, 90(2), 1241-1252.
- Mataix-Solera, J., & Cerdà, A. (2009). 1.1 Incendios forestales en España. *Ecosistemas terrestres y suelos. Efectos de los incendios forestales sobre los suelos en España*, 25-53.
- Mataix-Solera, J., Arcenegui, V., Guerrero, C., Mayoral, A. M., Morales, J., González, J., ... & Gómez, I. (2007). Water repellency under different plant species in a calcareous forest soil in a semiarid Mediterranean environment. *Hydrological Processes: An International Journal*, 21(17), 2300-2309.
- Matamoros, M. R., Merino, E. G., Ibáñez, N. I., & Bernal, E. M. (2008). Sensibilidad y grado de adaptación de " *Pinus halepensis*" mill. a la variabilidad climática en la provincia de Zaragoza. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales*, (26), 137-142.
- Matthews, S. (2013). Dead fuel moisture research: 1991–2012. *International Journal of Wildland Fire*, 23(1), 78-92.
- Mattsson, A. (1986). Seasonal variation in root growth capacity during cultivation of container grown *Pinus sylvestris* seedlings. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 1(1-4), 473-482.
- Mauri, A., Di Leo, M., De Rigo, D., & Caudullo, G. (2016). *Pinus halepensis and Pinus brutia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. *European Atlas of forest tree species*, 122-123.
- McCandless, T. C., Kosovic, B., & Petzke, W. (2020). Enhancing wildfire spread modelling by building a gridded fuel moisture content product with machine learning. *Machine Learning: Science and Technology*, 1(3), 035010.
- McLauchlan, K. K., Higuera, P. E., Miesel, J., Rogers, B. M., Schweitzer, J., Shuman, J. K., *et al.* (2020). Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *Journal of Ecology*, 108(5), 2047-2069.
- Menon, S., Hansen, J., Nazarenko, L., & Luo, Y. (2002). Climate effects of black carbon aerosols in China and India. *Science*, 297(5590), 2250-2253.
- Merino, J. L., Refoyo, E., Peinado, R., & Cuesta, E. (2008). Real-time representation of multielectrode ablation catheters by integration of computed tomographic geometry with three-dimensional electroanatomic mapping of left atrium and pulmonary veins. *Heart Rhythm*, 5(4), 628-629.
- Michael, Y., Helman, D., Glickman, O., Gabay, D., Brenner, S., & Lensky, I. M. (2021). Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information

derived from satellite vegetation index time-series. *Science of The Total Environment*, 764, 142844.

- Micheletti, S., Araya, C., & Figueroa, R. (2018). Sistematización del proceso de reconstrucción post incendios forestales en la región del Maule. 14 pp.
- Mitsopoulos, I. D., & Dimitrakopoulos, A. P. (2007). Allometric equations for crown fuel biomass of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Greece. *International Journal of Wildland Fire*, 16(5), 642-647.
- Moliner, J. I. U. (2004). Análisis del régimen de incendios forestales en los montes de Portaceli durante el siglo XX (Serra, Valencia). *Cuadernos de geografía*, (76), 50-59.
- Montenegro, G., Ginocchio, R., Segura, A., Keely, J. E., & Gómez, M. (2004). Regímenes de incendios y respuestas de la vegetación en dos regiones de clima mediterráneo. *Revista chilena de historia natural*, 77(3), 455-464.
- Montero, G., Cañellas, I., & Ruiz-Peinado, R. (2001). Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Forest Systems*, 10(1), 179-201.
- Mooney, H. A., & Kummerow, J. (1971). The comparative water economy of representative evergreen sclerophyll and drought deciduous shrubs of Chile. *Botanical Gazette*, 132(3), 245-252.
- Moraga, R. Q., Cisneros, J. R., & Relea, M. L. (2016). Prevención de megaincendios forestales mediante el diseño de planes de operaciones de extinción basados en nodos de propagación (Doctoral dissertation, Universidad de León).
- Moran, E., Lauder, J., Musser, C., Stathos, A., & Shu, M. (2017). The genetics of drought tolerance in conifers. *New Phytologist*, 216(4), 1034-1048.
- Morat, P., Le Mouél, J. L., & Granier, A. (1994). Electrical potential on a tree. A measurement of the sap flow?. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 3, Sciences de la vie*, 317(1), 98-101.
- Moreira, F., Arianoutsou, M., Corona, P., & De las Heras, J. (Eds.). (2011). Post-fire management and restoration of southern European forests (Vol. 24). Springer Science & Business Media.
- Moreira, F., Viedma, O., Arianoutsou, M., Curt, T., Koutsias, N., Rigolot, E., *et al.* (2011). Landscape-wildfire interactions in southern Europe: implications for landscape management. *Journal of environmental management*, 92(10), 2389-2402.
- Moreno, J.M. (2016). Los incendios forestales en España en un contexto de cambio climático: información y herramientas para la adaptación (INFOADAPT). Memoria Final del Proyecto presentada a la Fundación Biodiversidad; 327 pp.
- Moreno, M. V., Conedera, M., Chuvieco, E., & Pezzatti, G. B. (2014). Fire regime changes and major driving forces in Spain from 1968 to 2010. *Environmental Science & Policy*, 37, 11-22.

- Moriondo, M., Good, P., Durao, R., Bindi, M., Giannakopoulos, C., & Corte-Real, J. (2006). Potential impact of climate change on fire risk in the Mediterranean area. *Climate research*, 31(1), 85-95.
- Mukaka, M. M. (2012). A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi medical journal*, 24(3), 69-71.
- Mullick, D. B. (1975). A new tissue essential to necrophylactic periderm formation in the bark of four conifers. *Canadian Journal of Botany*, 53(21), 2443-2457.
- Mwesigwa, J., Collins, D. J., & Volkov, A. G. (2000). Electrochemical signaling in green plants: effects of 2, 4-dinitrophenol on variation and action potentials in soybean. *Bioelectrochemistry*, 51(2), 201-205.
- Myoung, B., Kim, S. H., Nghiem, S. V., Jia, S., Whitney, K., & Kafatos, M. C. (2018). Estimating live fuel moisture from MODIS satellite data for wildfire danger assessment in Southern California USA. *Remote Sensing*, 10(1), 87.
- Naciones Unidas. (1998). Protocolo de Kioto de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Naciones Unidas. (1998); GE.05-61702 (S) 130605 130605 Consultado: 23 de abril de 2021.
- Naveh, Z. (1975). The evolutionary significance of fire in the Mediterranean region. *Vegetatio*, 29(3), 199-208.
- Naveh, Z. (1991). The role of fire in Mediterranean vegetation. *Botanika Chronika*, 10, 385-405.
- Neary, D. G., Klopatek, C. C., DeBano, L. F., & Ffolliott, P. F. (1999). Fire effects on belowground sustainability: a review and synthesis. *Forest ecology and management*, 122(1-2), 51-71.
- Nesterov, V. (1949). Forest fires and methods of fire risk determination. Russian. Goslesbumizdat, Moscow.
- Nolan, R. H., Boer, M. M., Collins, L., Resco de Dios, V., Clarke, H. G., Jenkins, M., *et al.* (2020). Causes and consequences of eastern Australia's 2019-20 season of mega-fires. *Global change biology*.
- Nolan, R. H., Boer, M. M., Resco de Dios, V., Caccamo, G., & Bradstock, R. A. (2016). Large-scale, dynamic transformations in fuel moisture drive wildfire activity across southeastern Australia. *Geophysical Research Letters*, 43(9), 4229-4238.
- Nolan, R. H., Hedo, J., Arteaga, C., Sugai, T., & de Dios, V. R. (2018). Physiological drought responses improve predictions of live fuel moisture dynamics in a Mediterranean forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 263, 417-427.
- Nolan, R.H.; Blackman, C.J.; de Dios, V.R.; Choat, B.; Medlyn, B.E.; Li, X.; Bradstock, R.A.; Boer, M.M. (2020). Linking forest flammability and plant vulnerability to drought. *Forests*, 11(7), 779.

- Observatorio Astronómico Nacional, Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Fomento, España. Disponible en: <https://astronomia.ign.es/web/guest/hora-salidas-y-puestas-de-sol>. Consultado: 15 de diciembre de 2020.
- Olcina-Cantos, J. O. (2021). Cambio climático y riesgos en el ámbito mediterráneo. La necesidad de adaptación. *Territorium*, (28 (II)), 5-12.
- Olivar, J., Bogino, S., & Spiecker, H. (2009). Influencia del clima en el crecimiento radial de *Pinus halepensis* de diferentes clases sociales e identificación de las variables climáticas más importantes. In *Congresos Forestales*. Junio de 2009.
- Oliveras, I., Martínez-Vilalta, J., Jimenez-Ortiz, T., José Lledó, M., Escarré, A., & Piñol, J. (2003). Hydraulic properties of *Pinus halepensis*, *Pinus pinea* and *Tetraclinis articulata* in a dune ecosystem of Eastern Spain. *Plant Ecology*, 169, 131-141.
- Oliver-Villanueva, J. V., & Becker, G. (1993). Verwendungsrelevante Holzeigenschaften der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und ihre Variabilität im Hinblick auf Alter und Standort. *Forst und Holz*, 48(14), 387-391.
- Ortuño Pérez, S. F., & Fernández-Cavada, J. L. (2007). Evaluación económica de los daños por incendios forestales. Departamento de Economía y Gestión Forestal de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Montes de la Universidad Politécnica de Madrid. *Wildfire*, Sevilla, España.
- Osem, Y., Lavi, A., & Rosenfeld, A. (2011). Colonization of *Pinus halepensis* in Mediterranean habitats: consequences of afforestation, grazing and fire. *Biological Invasions*, 13(2), 485-498.
- Oyarce, P., & Gurovich, L. (2010). Electrical signals in avocado trees: Responses to light and water availability conditions. *Plant signaling & behavior*, 5(1), 34-41.
- Pacheco, A., Camarero, J. J., Ribas, M., Gazol, A., Gutierrez, E., & Carrer, M. (2018). Disentangling the climate-driven bimodal growth pattern in coastal and continental Mediterranean pine stands. *Science of the Total Environment*, 615, 1518-1526.
- Park, H., Park, J., Park, K., Ahn, T., & Son, J. (2018). Nondestructive measurement of paprika (*Capsicum annuum* L.) internal electrical conductivity and its relation to environmental factors. *Horticultural Science and Technology*, 36(5), 691-701.
- Pastor, F. (2020). Mediterranean SST report (Summer 2020). Centro De Estudios Ambientales Del Mediterráneo Ceam DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.13817.70243>.
- Pausas, J. G. (2004). Changes in fire and climate in the eastern Iberian Peninsula (Mediterranean basin). *Climatic change*, 63(3), 337-350.
- Pausas, J. G., & Keeley, J. E. (2009). A burning story: the role of fire in the history of life. *BioScience*, 59(7), 593-601.

- Pausas, J. G., & Vallejo, V. R. (1999). The role of fire in European Mediterranean ecosystems. In *Remote sensing of large wildfires* (pp. 3-16). Springer, Berlin, Heidelberg.
- Pausas, J. G., Llovet, J., Rodrigo, A., & Vallejo, R. (2008). Are wildfires a disaster in the Mediterranean basin?—A review. *International journal of wildland fire*, 17(6), 713-723.
- Pausas, J. G., Ribeiro, E., & Vallejo, R. (2004). Post-fire regeneration variability of *Pinus halepensis* in the eastern Iberian Peninsula. *Forest ecology and management*, 203(1-3), 251-259.
- Pedraza Moromenacho, J. L. (2017). Diseño e implementación de un sistema de adquisición de señales de electromiograma (emg) basado en electrodos secos y su utilización para el control de una mano robótica (Bachelor's thesis, Quito, 2017.).
- Pellizzaro, G., Cesaraccio, C., Duce, P., Ventura, A., & Zara, P. (2007). Relationships between seasonal patterns of live fuel moisture and meteorological drought indices for Mediterranean shrubland species. *International Journal of Wildland Fire*, 16(2), 232-241.
- Pellizzaro, G., Duce, P., Ventura, A., & Zara, P. (2007). Seasonal variations of live moisture content and ignitability in shrubs of the Mediterranean Basin. *International Journal of Wildland Fire*, 16(5), 633-641.
- Pellizzaro, G., Ventura, A., Arca, B., Arca, A., Duce, P., Bacciu, V., & Spano, D. (2010, November). Estimating effects of future climate on duration of fire danger season in Sardinia. In *Proceedings of VI International Forest Fire Research Conference* (pp. 15-18). Coimbra.
- Peñuelas, J., Sabaté, S., Filella, I., & Gracia, C. (2004). Efectos del cambio climático sobre los ecosistemas terrestres: observación, experimentación y simulación. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*, 425-460.
- Peters, S. (1996). Untersuchungen über die Holzeigenschaften der Stieleiche (*Quercus robur* L.) und ihre Beeinflussung durch die Bestandesdichte. *Papierflieger*.
- Peterson, S. H., Roberts, D. A., & Dennison, P. E. (2008). Mapping live fuel moisture with MODIS data: A multiple regression approach. *Remote Sensing of Environment*, 112(12), 4272-4284.
- Pfan, H., Aschan, G., Langenfeld-Heyser, R., Wittmann, C., & Loose, M. (2002). Ecology and ecophysiology of tree stems: cortical and wood photosynthesis. *Naturwissenschaften*, 89(4), 147-162.
- Piccolino, M., & Wade, N. J. (2012). Carlo Matteucci (1811–1868), the “frogs pile”, and the Risorgimento of electrophysiology. *cortex*, 48(6), 645.
- Pickard, B. G. (1973). Action potentials in higher plants. *The Botanical Review*, 39(2), 172-201.

- Piñol, J., Terradas, J., & Lloret, F. (1998). Climate warming, wildfire hazard, and wildfire occurrence in coastal eastern Spain. *Climatic change*, 38(3), 345-357.
- Pivovarov, A. L., Emery, N., Sharifi, M. R., Witter, M., Keeley, J. E., & Rundel, P. W. (2019). The effect of ecophysiological traits on live fuel moisture content. *Fire*, 2(2), 28.
- Planning of sample size for wood anatomical investigations. *Holz als Roh-und Werkstoff* (Germany, FR).
- Prada, M. A., Gordo, J., De Miguel, J., Mutke, S., Catalán-Bachiller, G., Iglesias, S., & Gil, L. (1997). Regiones de Procedencia. *Pinus pinea*. Nacionales P, editor Madrid.
- Prislán, P., Gričar, J., De Luis, M., Novak, K., Martínez del Castillo, E., Schmitt, U., *et al.* (2016). Annual cambial rhythm in *Pinus halepensis* and *Pinus sylvestris* as indicator for climate adaptation. *Frontiers in plant science*, 7, 1923.
- Prutchi, D., & Norris, M. (2005). Design and development of medical electronic instrumentation: a practical perspective of the design, construction, and test of medical devices. John Wiley & Sons.
- Puértolas, J., Sierra, R., & Pardos, J. A. (2005). Comportamiento fisiológico de una plantación de *Pinus halepensis* y *Pinus pinea* en un antiguo terreno agrícola. IV Congreso Forestal Español, Zaragoza, Spain, 26–30 September 2005.
- Puratich, F., & Wilson, H. (2013). Valorización integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal en condiciones mediterráneas (Doctoral dissertation, Universitat Politècnica de València).
- Pyatygin, S. S., Opritov, V. A., & Vodeneev, V. A. (2008). Signaling role of action potential in higher plants. *Russian Journal of Plant Physiology*, 55(2), 285-291.
- Qi, Y., Dennison, P. E., Jolly, W. M., Kropp, R. C., & Brewer, S. C. (2014). Spectroscopic analysis of seasonal changes in live fuel moisture content and leaf dry mass. *Remote Sensing of Environment*, 150, 198-206.
- Qi, Y., Dennison, P. E., Spencer, J., & Riaño, D. (2012). Monitoring live fuel moisture using soil moisture and remote sensing proxies. *Fire Ecology*, 8(3), 71-87.
- Quereda, J., Montón, E., Escrig, J. (2000). La evolución de las precipitaciones en la cuenca occidental del Mediterráneo ¿tendencia o ciclos?. *Investigaciones geográficas*, 4: 17-35.
- Quilez, R. & Merida, E. (2015). Manual de Seguridad en Operaciones de Extinción de Incendios Forestales; Pau Costa Foundation: Barcelona, Spain, 2015; 333p, ISBN 978-84-617-1323-3.
- Quílez, R., Valbuena, L., Vendrell, J., Uytewaal, K., & Ramirez, J. (2020). Establishing Propagation Nodes as a Basis for Preventing Large Wildfires: The Proposed Methodology. *Frontiers in Forests and Global Change*, 3, 548799.
- Raison, R. J., Khanna, P. K., & Jacobsen, K. L. (2009). Effects of Fire on Forest Nutrient Cycles Joan Romanya and Isabel Serrasolses. In *Fire effects on soils and restoration strategies* (pp. 241-272). CRC Press.

- Raison, R. J., Khanna, P. K., & Woods, P. V. (1985). Mechanisms of element transfer to the atmosphere during vegetation fires. *Canadian journal of forest research*, 15(1), 132-140.
- Ramanathan, V., & Carmichael, G. (2008). Global and regional climate changes due to black carbon. *Nature geoscience*, 1(4), 221-227.
- Ramírez-Valiente, J. A., Santos del Blanco, L., Alía, R., Robledo-Arnuncio, J. J., & Climent, J. (2022). Adaptation of Mediterranean forest species to climate: Lessons from common garden experiments. *Journal of Ecology*, 110(5), 1022-1042.
- Ramos, A., (2011). Metodología para el Cálculo de las Corrientes de Cortocircuito. Universidad Técnica de Bolívar, Cartagena de Indias.
- Rao, K., Williams, A. P., Flefil, J. F., & Konings, A. G. (2020). SAR-enhanced mapping of live fuel moisture content. *Remote Sensing of Environment*, 245, 111797.
- Rathgeber, C. B., Cuny, H. E., & Fonti, P. (2016). Biological basis of tree-ring formation: a crash course. *Frontiers in Plant Science*, 7, 734.
- Rathgeber, C., Nicault, A., Guiot, J., Keller, T., Guibal, F., & Roche, P. (2000). Simulated responses of *Pinus halepensis* forest productivity to climatic change and CO₂ increase using a statistical model. *Global and Planetary Change*, 26(4), 405-421.
- Reiner, A. L. (2017). Fire Behavior in Beetle-killed Stands: A brief review of literature focusing on early stages after beetle attack. US Forest Service Pacific Southwest Region: Vallejo, CA, USA, 5, 1-5.
- Reinhard, M., Rebetez, M., & Schlaepfer, R. (2005). Recent climate change: rethinking drought in the context of forest fire research in Ticino, South of Switzerland. *Theoretical and Applied Climatology*, 82(1), 17-25.
- Resco de Dios, V. (2022). Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe.
- Resco de Dios, V. (2022). Ola de incendios en Europa: la anomalía que será la norma. Publicado: 17 julio 2022. Disponible en: <https://theconversation.com/ola-de-incendios-en-europa-la-anomalia-que-sera-la-norma-187150>. Consultado: 27 de febrero de 2023
- Resco de Dios, V. (2022). These are the implications of the latest wave of mega-fires for the European Green Deal. Publicado: 7 diciembre 2022. Disponible en: <https://theconversation.com/these-are-the-implications-of-the-latest-wave-of-mega-fires-for-the-european-green-deal-195982>. Consultado: 26 de febrero de 2023.
- Resco de Dios, V., Fischer, C., & Colinas, C. (2007). Climate change effects on Mediterranean forests and preventive measures. *New forests*, 33(1), 29-40.
- Restrepo, L. F., & González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.

- Rhodes, J. D., Thain, J. F., & Wildon, D. C. (1996). The pathway for systemic electrical signal conduction in the wounded tomato plant. *Planta*, 200(1), 50-57.
- Richter, K., Eckstein, D., & Holmes, R. L. (1991). The dendrochronological signal of pine trees (*Pinus* spp.) in Spain.
- Rick, T., Ontiveros, M. Á. C., Jerardino, A., Mariotti, A., Méndez, C., & Williams, A. N. (2020). Human-environmental interactions in Mediterranean climate regions from the Pleistocene to the Anthropocene. *Anthropocene*, 31, 100253.
- Ríos-Rojas, L., Morales-Moraga, D., Alcalde, J. A., & Gurovich, L. A. (2015). Use of plant woody species electrical potential for irrigation scheduling. *Plant signaling & behavior*, 10(2), e976487.
- Rodrigues, M., Camprubí, À. C., Balaguer-Romano, R., Megía, C. J. C., Castañares, F., Ruffault, J., *et al.* (2023). Drivers and implications of the extreme 2022 wildfire season in Southwest Europe. *Science of the total environment*, 859, 160320.
- Rodríguez, E., & Gutiérrez, J. M. (2018). Escenarios-PNACC 2017: Nueva colección de escenarios de cambio climático regionalizados del Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático (PNACC).
- Rodríguez, J. M. (2016). Los incendios forestales en España en un contexto de cambio climático: información y Herramientas para la Adaptación (Infoadapt) 326.
- Rodríguez-Calcerrada, J., Salomón, R., & Gil, L. (2015). Transporte y reciclaje de CO₂ en el interior del árbol: factores que complican la estimación de la respiración leñosa a través de la emisión radial de CO₂. *Bosque (Valdivia)*, 36(1), 5-14.
- Rojas-Briales, E., Delgado-Artés, R., & Cabrera-Bonet, M. (2018). Human desertification and disempowerment of rural territories. *Forestry in the Midst of Global Changes*. CRC Press, Taylor and Francis Group, Boca Raton/London/New York, 317-346.
- Romero, R., & Emanuel, K. (2017). Climate change and Hurricane-like extratropical cyclones: Projections for North Atlantic polar lows and medicanes based on CMIP5 models. *Journal of Climate*, 30(1), 279-299.
- Roms, D. M., Seeley, J. T., Vollaro, D., & Molinari, J. (2014). Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science*, 346(6211), 851-854.
- Rosenvald, K., Ostonen, I., Uri, V., Varik, M., Tedersoo, L., & Lohmus, K. (2013). Tree age effect on fine-root and leaf morphology in a silver birch forest chronosequence. *European Journal of Forest Research*, 132(2), 219-230.
- Rothermel, R. C. (1983). How to predict the spread and intensity of forest and range fires (Vol. 143). US Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station.
- Rubio, J. L., Forteza, J., Andreu, V., & Cerni, R. (1997). Soil profile characteristics influencing runoff and soil erosion after forest fire: a case study (Valencia, Spain). *Soil Technology*, 11(1), 67-78.

- Ruffault, J., Martin-StPaul, N., Pimont, F., & Dupuy, J. L. (2018). How well do meteorological drought indices predict live fuel moisture content (LFMC)? An assessment for wildfire research and operations in Mediterranean ecosystems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 262, 391-401.
- Ruiz Benito, P, Herrero, A, Zavala, MA. (2013): Vulnerabilidad de los bosques españoles frente al cambio climático evaluación mediante modelos. *Ecosistemas*, 22(3): 21-28.
- Rundel, P. W. (1998). Landscape disturbance in Mediterranean-type ecosystems: an overview. *Landscape disturbance and biodiversity in Mediterranean-type ecosystems*, 3-22.
- S., Qin, D., Manning, M., Chen, Z., Marquis, M., Averyt, K. B., Tignor, M. & Miller, H. L. (eds.): Cambridge: Cambridge University Press.
- Saket, M., Altrell, D., Vuorinen, P., Dalsgaard, S., & Andersson, L. G. B. (2004). National forest inventory field manual template. no. August, 83.
- Salomonsson, D., Soder, L., & Sannino, A. (2009). Protection of low-voltage DC microgrids. *IEEE Transactions on power delivery*, 24(3), 1045-1053.
- SALTUS. (1997). Spot Fires: Mechanisms, Análisis and Modeling; Technical Annex; Commission of the European Communities Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria Laboratorio del Fuego, Ministerio de Agricultura, Gobierno de España: Madrid, Spain, 1997; 20p.
- Sánchez-Costa, E., Poyatos, R., & Sabaté, S. (2015). Contrasting growth and water use strategies in four co-occurring Mediterranean tree species revealed by concurrent measurements of sap flow and stem diameter variations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 207, 24-37.
- Sancho, J.L. & Moraga, R.Q. (2007). Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana. In *Actas del 7 Congreso Forestal Español*; Sociedad Española de Ciencias Forestales: Plasencia, Spain, 2017.
- San-Miguel-Ayanz, J., Moreno, J. M., & Camia, A. (2013). Analysis of large fires in European Mediterranean landscapes: Lessons learned and perspectives. *Forest Ecology and Management*, 294, 11-22.
- Santibáñez, F., & Uribe, J. M. (1990). Atlas agroclimático de Chile, regiones V y Metropolitana, Universidad de Chile. Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales. Laboratorio de Agroclimatología, Santiago, Chile.
- Sanz, M. J., & Galán, E. (2020). Impactos y riesgos derivados del cambio climático en España. Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico (MITECO): Madrid, Spain.
- Sardans, J., & Peñuelas, J. (2013). Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: impacts of climatic change. *Plant and soil*, 365(1), 1-33.

- Sauter, U. (1992). Technologische Holzeigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) als Ausprägung unterschiedlicher Wachstumsbedingungen (Doctoral dissertation).
- Scarff, F. R., Lenz, T., Richards, A. E., Zanne, A. E., Wright, I. J., & Westoby, M. (2021). Effects of plant hydraulic traits on the flammability of live fine canopy fuels. *Functional Ecology*, 35(4), 835-846.
- Schaller, A., & Oecking, C. (1999). Modulation of plasma membrane H⁺-ATPase activity differentially activates wound and pathogen defense responses in tomato plants. *The Plant Cell*, 11(2), 263-272.
- Schiller, G., & Cohen, Y. (1995). Water regime of a pine forest under a Mediterranean climate. *Agricultural and Forest Meteorology*, 74(3-4), 181-193.
- Schiller, G., & Cohen, Y. (1998). Water balance of *Pinus halepensis* Mill. afforestation in an arid region. *Forest ecology and management*, 105(1-3), 121-128.
- Schroeder, M. J., & Buck, C. C. (1970). Fire weather. *Agricultural Handbook No. 360*. Forest Service. US Department of Agriculture, Washington, DC.
- Schröter, D., Cramer, W., Leemans, R., Prentice, I. C., Araújo, M. B., Arnell, N. W., *et al.* (2005). Ecosystem service supply and vulnerability to global change in Europe. *Science*, 310(5752): 1333-1337.
- Schultz, C. A., Thompson, M. P., & McCaffrey, S. M. (2019). Forest Service fire management and the elusiveness of change. *Fire ecology*, 15(1), 1-15.
- Seeling, U. (1991). Abnorme Kernbildung bei Rotbuche und ihr Einfluss auf holzbiologische und holztechnologische Kenngrößen (Doctoral dissertation, Dissertation, Forstwissenschaftlicher Fachber., Univ. Göttingen: 167 S).
- Sellin, A. (1991). Variation in sapwood thickness of *Picea abies* in Estonia depending on the tree age. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 6(1-4), 463-469.
- Selma, M. A. E., Fructuoso, M. F. C., Pérez, J. M. M., Bernabéu, P. M., Fernández, J. M., & Maya, F. L. (2017). La respuesta de los bosques de "*Pinus halepensis*" al cambio climático y los eventos de sequía extrema: modelos preliminares. In *Riesgos Ambientales en la Región de Murcia* (pp. 163-185). Ediciones de la Universidad de Murcia.
- Sempere Souvannavong, J. D. (2016). Espacios despoblados de la provincia de Alicante: la Vall de Seta. *Espacios despoblados de la provincia de Alicante: la Vall de Seta*, 475-485.
- Shakesby, R. A. (2011). Post-wildfire soil erosion in the Mediterranean: Review and future research directions. *Earth-Science Reviews*, 105(3-4), 71-100.
- Shaposhnikov, D., Revich, B., Bellander, T., Bedada, G. B., Bottai, M., Kharkova, T., *et al.* (2014). Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010. *Epidemiology (Cambridge, Mass.)*, 25(3), 359.

- Sharples, J. J., Lewis, S. C., & Perkins-Kirkpatrick, S. E. (2021). Modulating influence of drought on the synergy between heatwaves and dead fine fuel moisture content of bushfire fuels in the Southeast Australian region. *Weather and Climate Extremes*, 31, 100300.
- Sivrikaya, F., & Küçük, Ö. (2022). Modeling forest fire risk based on GIS-based analytical hierarchy process and statistical analysis in Mediterranean region. *Ecological Informatics*, 68, 101537.
- Smith, D. M., & Allen, S. J. (1996). Measurement of sap flow in plant stems. *Journal of Experimental Botany*, 47(12), 1833-1844.
- Soler Martin, M., Bonet, J. A., Martínez De Aragón, J., Voltas, J., Coll, L., & Resco De Dios, V. (2017). Crown bulk density and fuel moisture dynamics in *Pinus pinaster* stands are neither modified by thinning nor captured by the Forest Fire Weather Index. *Annals of Forest Science*, 74(3), 1-11.
- Spence, R. (2008). *Introductory Circuits*. John Wiley and Sons. pp. 99–. ISBN 978-0-470-77971-2.
- Stankovic, B., Zawadzki, T., & Davies, E. (1997). Characterization of the variation potential in sunflower. *Plant physiology*, 115(3), 1083-1088.
- Stocks, B. J., Lawson, B. D., Alexander, M. E., Wagner, C. V., McAlpine, R. S., Lynham, T. J., & Dube, D. E. (1989). The Canadian forest fire danger rating system: an overview. *The Forestry Chronicle*, 65(6), 450-457.
- Sukhova, E., Akinchits, E., & Sukhov, V. (2017). Mathematical models of electrical activity in plants. *The Journal of membrane biology*, 250(5), 407-423.
- Sullivan, A. L. (2009). Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 18(4), 369-386.
- Sutherland, E. R., Make, B. J., Vedal, S., Zhang, L., Dutton, S. J., Murphy, J. R., & Silkoff, P. E. (2005). Wildfire smoke and respiratory symptoms in patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 115(2), 420-422.
- Svenning, J. C., & Skov, F. (2006). Potential impact of climate change on the northern nemoral forest herb flora of Europe. *Biodiversity & Conservation*, 15(10), 3341-3356.
- Syphard, A. D., Radeloff, V. C., Hawbaker, T. J., & Stewart, S. I. (2009). Conservation threats due to human-caused increases in fire frequency in Mediterranean-climate ecosystems. *Conservation Biology*, 23(3), 758-769.
- Talucci, A. C., & Krawchuk, M. A. (2019). Dead forests burning: the influence of beetle outbreaks on fire severity and legacy structure in sub-boreal forests. *Ecosphere*, 10(5), e02744.
- Tamayo Carmona, J. y Núñez Mora, J. A. (2020). Precipitaciones intensas en la comunidad valenciana. Análisis, sistemas de predicción y perspectivas ante el

cambio climático en Riesgo de inundación en España: análisis y soluciones para la generación de territorios resilientes (coord. por Inmaculada López Ortiz, Joaquín Melgarejo Moreno). Universidad de Alicante, 49-62.

- Thaler, M. S. (2021). *The only EKG book you'll ever need*. Lippincott Williams & Wilkins.
- The Editors of Encyclopaedia Britannica. Electric power. Encyclopædia Britannica. Encyclopædia Britannica, inc. Disponible en: <https://www.britannica.com/technology/electric-power>. Consultado: 31 de agosto de 2020
- Thomas, C. D., Cameron, A., Green, R. E., Bakkenes, M., Beaumont, L. J., Collingham, Y. C., *et al.* (2004). Extinction risk from climate change. *Nature*, 427(6970), 145-148.
- Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1), 55-94.
- Thuiller, W. (2003). BIOMOD—optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Global change biology*, 9(10), 1353-1362.
- Thuiller, W., Lavorel, S., Araújo, M. B., Sykes, M. T., & Prentice, I. C. (2005). Climate change threats to plant diversity in Europe. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(23), 8245-8250.
- Tomar, J. S., Kranjčić, N., Đurin, B., Kanga, S., & Singh, S. K. (2021). Forest fire hazards vulnerability and risk assessment in Sirmaur district forest of Himachal Pradesh (India): A geospatial approach. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 10(7), 447.
- Trabaud, L. (1990). Fire resistance of *Quercus coccifera* L. garrigue. In 'Fire in ecosystem dynamics'. (Eds JG Goldammer and MJ Jenkins) pp. 21–32.
- Tubbs, R. S., Loukas, M., Shoja, M. M., & Cohen-Gadol, A. A. (2009). Wilhelm His (1831–1904) and his contributions to neuroanatomy. *Child's Nervous System*, 25(12), 1613-1615.
- Turco, M., Llasat, M. C., von Hardenberg, J., & Provenzale, A. (2014). Climate change impacts on wildfires in a Mediterranean environment. *Climatic Change*, 125(3), 369-380.
- UNFCCC. Paris Agreement. In *Proceedings of the 21st Paris Climate Change Conference COP21*, Paris, France, 30 November–12 December 2018.
- UNFCCC. Sharm el-Sheikh Implementation Plan. In *Proceedings of the 27th Conference of the Parties of the UNFCCC (COP 27)*, Sharm El-Sheikh, Egypt, 6–18 November 2022.
- United Nation. Sustainable Development Knowledge Platform. *Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development*; United Nation: New York, NY, USA, 2015.

- Urli, M., Delzon, S., Eyermann, A., Couallier, V., García-Valdés, R., Zavala, M. A., & Porté, A. J. (2014). Inferring shifts in tree species distribution using asymmetric distribution curves: a case study in the Iberian mountains. *Journal of vegetation Science*, 25(1), 147-159.
- Valbuena Perez, P., Peso Taranco, C. E. D., & Bravo Oviedo, F. (2008). Stand density Management diagrams for two mediterranean pine species in Eastern Spain. *Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales*, 17(2), 97-104.
- Valenzuela, N. V. U., & Cáceres, F. (2011). Incendios forestales: principales consecuencias económicas y ambientales en Chile. *RIAT: Revista Interamericana de Medioambiente y Turismo*, 7(1), 18-24.
- Valladares, F., Vilagrosa, A., Peñuelas, J., Ogaya, R., Camarero, J.J, Corcuera, L., Sisó, S., Gil-Pelegrín, E. (2004). Estrés hídrico ecofisiología y escalas de la sequía. En: Valladares, F. 2004. *Ecología del bosque mediterráneo en un mundo cambiante*. Páginas 163-190. Ministerio de Medio Ambiente, EGRAF, S. A., Madrid. ISBN 84-8014-552-8.
- Vallejo, R., Serrasolses, I., Alloza, J. A., Baeza, M. J., Bladé, C., Chirino, E., *et al.* (2009). Long-term restoration strategies and techniques. Fire effects on soils and restoration strategies. Science Publishers Inc., Enfield, 373-398.
- Van Wagner, C. E., & Forest, P. (1987). Development and structure of the canadian forest fireweather index system. In *Can. For. Serv., Forestry Tech. Rep.*
- Varol, T., Ertugrul, M., & Ozel, H. B. (2017). Drought-Forest Fire Relationship. *Journal of Mediterranean Identities—Environment, Society, Culture*, 283-303.
- Vasilakos, C., Kalabokidis, K., Hatzopoulos, J., Kallos, G., & Matsinos, Y. (2007). Integrating new methods and tools in fire danger rating. *International Journal of Wildland Fire*, 16(3), 306-316.
- Verde, J. C., & Zêzere, J. L. (2010). Assessment and validation of wildfire susceptibility and hazard in Portugal. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 10(3), 485-497.
- Vicente, E., Vilagrosa, A., Ruiz-Yanetti, S., Manrique-Alba, À., González-Sanchís, M., Moutahir, H., *et al.* (2018). Water balance of Mediterranean *Quercus ilex* L. and *Pinus halepensis* Mill. *Forests in semiarid climates: a review in a climate change context*. *Forests*, 9(7), 426.
- Viegas, D. X., Soares, J., & Almeida, M. (2013). Combustibility of a mixture of live and dead fuel components. *International Journal of Wildland Fire*, 22(7), 992-1002.
- Vilén, T., & Fernandes, P. M. (2011). Forest fires in Mediterranean countries: CO2 emissions and mitigation possibilities through prescribed burning. *Environmental Management*, 48(3), 558-567.

- Villa-Hernández, J., Alfaro-Ponce, M., & Vega-Cano, G. (2017). Prototipo de silla de ruedas inteligente controlada por electromiograma. *Boletín Científico INVESTIGIUM de la Escuela Superior de Tizayuca*, 2(4).
- Volkov, A. G., & Ranatunga, D. R. A. (2006). Plants as environmental biosensors. *Plant signaling & behavior*, 1(3), 105-115
- Volkov, A. G., Adesina, T., & Jovanov, E. (2007). Closing of Venus flytrap by electrical stimulation of motor cells. *Plant signaling & behavior*, 2(3), 139-145.
- Wang, K., & Zhang, S. (2019). Extracellular electron transfer modes and rate-limiting steps in denitrifying biocathodes. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(16), 16378-16387.
- Wang, X., Wotton, B. M., Cantin, A. S., Parisien, M. A., Anderson, K., Moore, B., & Flannigan, M. D. (2017). cffdrs: an R package for the Canadian forest fire danger rating system. *Ecological Processes*, 6(1), 1-11.
- Watson, R. (ed.) (2001). *Climate Change 2001: Synthesis Report*. A report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Ginebra.
- Wilson, N., Bradstock, R., & Bedward, M. (2021). Detecting the effects of logging and wildfire on forest fuel structure using terrestrial laser scanning (TLS). *Forest Ecology and Management*, 488, 119037.
- Wobst, J. (1995). Auswirkungen von Standortwahl und Durchforstungsstrategie auf verwertungsrelevante Holzeigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.(Franco)). na.
- Woodward, S., & Pearce, R. B. (1988). The role of stilbenes in resistance of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) to entry of fungal pathogens. *Physiological and molecular plant pathology*, 33(1), 127-149.
- Wright, J. P., & Fisher, D. B. (1981). Measurement of the sieve tube membrane potential. *Plant Physiology*, 67(4), 845-848.
- WWF España 2021 paisajes cortafuegos. Propuesta de WWF España y ANP | WWF Portugal para adaptar el territorio ibérico a los incendios. Disponible en: https://www.wwf.es/nuestro_trabajo/bosques/incendios_forestales_/. Consultado: 23 de noviembre de 2022.
- Ye, T., Wang, Y., Guo, Z., & Li, Y. (2017). Factor contribution to fire occurrence, size, and burn probability in a subtropical coniferous forest in East China. *PLoS one*, 12(2), e0172110.
- Yebra, M., Dennison, P. E., Chuvieco, E., Riaño, D., Zylstra, P., Hunt Jr, E. R., *et al.* (2013). A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sensing of Environment*, 136, 455-468.
- Yebra, M., Quan, X., Riaño, D., Larraondo, P. R., van Dijk, A. I., & Cary, G. J. (2018). A fuel moisture content and flammability monitoring methodology for continental

Australia based on optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 212, 260-272.

- You, W., Lin, L., Wu, L., Ji, Z., Zhu, J., Fan, Y., & He, D. (2017). Geographical information system-based forest fire risk assessment integrating national forest inventory data and analysis of its spatiotemporal variability. *Ecological Indicators*, 77, 176-184.
- Zapata, R., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Fuente, D., Mateo Pla, M. A., Luzuriaga, J. E., & Moreno Esteve, J. C. (2021). Seasonal variations of electrical signals of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions. *Plant Signaling & Behavior*, 16(10), 1948744.
- Zapata, R., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Luzuriaga, J. E., Mateo Pla, M. A., & Urchueguía, J. F. (2020). Evaluation of electrical signals in pine trees in a mediterranean forest ecosystem. *Plant Signaling & Behavior*, 15(10), 1795580.
- Zapata, R., Oliver-Villanueva, J. V., Lemus-Zúñiga, L. G., Mateo Pla, M. A., & Luzuriaga, J. E. (2022). Electrical Responses of *Pinus halepensis* Mill. as an Indicator of Wildfire Risk in Mediterranean Forests by Complementing Live Fuel Moisture. *Forests*, 13(8), 1189.
- Zimmermann, M. R., Maischak, H., Mithöfer, A., Boland, W., & Felle, H. H. (2009). System potentials, a novel electrical long-distance apoplastic signal in plants, induced by wounding. *Plant physiology*, 149(3), 1593-1600.

11. ANEXO I



Plant Signaling & Behavior




ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/kpsb20>

Evaluation of electrical signals in pine trees in a mediterranean forest ecosystem

Rodolfo Zapata , Jose-Vicente Oliver-Villanueva , Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga , Jorge E. Luzuriaga , Miguel A. Mateo Pla & Javier F. Urchueguía

To cite this article: Rodolfo Zapata , Jose-Vicente Oliver-Villanueva , Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga , Jorge E. Luzuriaga , Miguel A. Mateo Pla & Javier F. Urchueguía (2020): Evaluation of electrical signals in pine trees in a mediterranean forest ecosystem, Plant Signaling & Behavior, DOI: [10.1080/15592324.2020.1795580](https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1795580)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/15592324.2020.1795580>

 Published online: 20 Jul 2020.

 Submit your article to this journal [↗](#)

 Article views: 12

 View related articles [↗](#)





 View Crossmark data [↗](#)

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=kpsb20>

RESEARCH PAPER



Evaluation of electrical signals in pine trees in a mediterranean forest ecosystem

Rodolfo Zapata , Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga , Jorge E. Luzuriaga , Miguel A. Mateo Pla , and Javier F. Urchueguía

ITACA - Institute of Information and Communication Technologies, Research Group ICT against Climate Change, Universitat Politècnica De València, València, Spain

ABSTRACT

Electric potential differences in living plants are explained by theories based on sap flow. In order to acquire more advanced knowledge about the spatial distribution of these electric potential measures in trees, this research aims to analyze electrical signals in a population of Aleppo pines (*Pinus halepensis* Mill.) in a representative Mediterranean forest ecosystem.

The specific research objective is to assess some of the most significant factors that influence the distribution pattern of those electric signals: tree age, measurement type and electrode placement.

The research has been conducted in representative forest stands, obtaining measurements of different representative trees. After a statistical evaluation of the obtained results, the main conclusions of our research are:

- A. Tree maturity influences directly on electric potential.
- B. Maximum electrical signals can be measured in young pines showing values of 0.6 V and 0.6 μ A for voltage and current, respectively.
- C. The distribution patterns of both voltage and short-circuit current depending on electrode placement are uniform.

ARTICLE HISTORY

Received 28 April 2020
Revised 6 July 2020
Accepted 7 July 2020

KEYWORDS

Natural electric signs; plant electrical potential; natural electrical power; mediterranean pines; tree age influence; electrode placement influence; adaptive forest management

1. Introduction

Plants have electrical activity; this fact was first revealed by Burdon-Sanderson¹ and Darwin² by observing insectivorous plants. Bose³ and then Pickard⁴ evidenced the existence of action potentials in some plants regardless of the presence of rapid leaf movements. Regarding trees, Wright and Fisher⁵ detected the existence of a difference in continuous electrical potential between the electrodes inserted in the tree's phloem and the surrounding soil.

There are both, physical and biological hypotheses to explain the origin of the electrical signals measured in plants that have been scientifically documented.

On one hand, the biological hypothesis establishes that different parts of the plants develop in their evolution—an internal system.⁶ Following this, the transmission of electrical signals at the cellular level activates physiological responses to external environmental stimuli.⁶ In this context, different studies have reported the effect of different stimuli, such as light conditions,^{7,8} temperature variations,^{9–13} and mechanical wounds.^{6,14}



According to some authors^{6,15–18} the variation of the electrical signals depends on the intensity of the stimulation that could be associated with changes in water tension or ion concentrations, creating a transient electrochemical imbalance. These electrical signals would be transmitted through the living cells of plants. Understanding mechanisms of electrical responses, changes in physiological processes and predicting

responses to stress factors requires mathematical modeling of electrical activity in plant organisms, a review of such models can be found in Sukhova.¹⁹

On the other hand, the physical hypothesis is based on the fact that trees continuously suck water, nutrients and charged particles into the xylem by transpiration.^{15,20} In this process, a pH imbalance is created between the tree and the soil, which causes an electric current that circulates between different parts of the trees.²⁰ Several experiments to support this hypothesis are available in different studies, e.g., the phloem,¹⁵ the xylem and the leaves,²⁰ as well as other elements of the living tree and the adjacent soil.²¹

Another physical theory is based on the fact that the electric current is the result of the electrokinetic phenomenon, which is caused by the movement of liquids in a porous medium.^{22,23} In order to model the physical models behind this potential, it is necessary to perform the experiments under the controlled conditions of a laboratory. Additionally, several works have been done with agricultural species under laboratory conditions.^{6,24–26} We also have to take into account that some of these studies are limited only to analyzing just the voltage data.^{23,27}

All these requirements make it difficult the researches about trees in forests, which could explain the reduced number of publications found. For example, the studies in^{20,21,28,29} observed electrical signals in individual trees, which do not allow analyzing the variability between individuals in an

CONTACT Rodolfo Zapata  rozaza@upv.es  ITACA - Institute of Information and Communication Technologies, Research Group ICT against Climate Change, Universitat Politècnica De València, València 46022, Spain

© 2020 Taylor & Francis Group, LLC

ecosystem. Furthermore, the few investigations that we have been able to document have been carried out mainly in Continental and central European climatic areas, e.g., *Aesculus hippocastanum*³⁰ and *Populus nigra*²³ both in France, *Eucalyptus globulus* in Portugal,³⁰ *Salix alba* in Austria,³¹ *Quercus spp.* and *Fagus sylvatica*.^{32,33}

Consequently, rigorous analysis of electrical signals has not been found related to, neither coniferous species nor Mediterranean ecosystems. For these reasons, the present study aims to fill this lack of knowledge. Focusing on the characterization and analysis of the electric signals under natural conditions (outside laboratories) exploring the behavior of the two components of electrical signals (voltage and short-circuit current (ISC)) in a representative population of Aleppo pines (*Pinus halepensis* Mill.) in the Mediterranean area.

A suitable application of these electrical signals measures is the idea of using plants as biosensors. This idea has been studied by other authors in research laboratories under controlled conditions.^{24–26,34} In order to use trees in the wild forest as biosensors, we have to face the problem of the lack of information on electrical signals in natural uncontrolled conditions. Thus, we consider it necessary to create a good research base on the behavior of those electrical signals of trees, both statically and dynamically.

In the present work, we have evaluated the most significant static factors that influence on the distribution of voltage and ISC electrical signals, specifically: i) the influence of tree age, ii) the electrode placement (height and orientation of the assignment) and iii) the measurement settings (bipolar or referenced to ground setups).

2. Material and methods

Next, we describe the principal material and methods used in this study, which was carried out outside laboratory in representative pine trees belonging to a Mediterranean forest.

2.1 Sample stands

Conifer species are very representative of the Mediterranean area, and one of the most important of them is the Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.).^{35–39} We surveyed a series of potential forests for this study using the layers for the Geographical Information System (GIS) of the Spanish National Forest Inventory.⁴⁰ We look for pole and pure mature stands of *Pinus halepensis* in Eastern Spain. Because of the different physiological behavior of the trees according to the age,^{15,41} we include the tree age as a critical variable in the research design and in the sample stands selection. Thus, to capture a representative tree population in these forests, we considered the following forest characteristics:

- (A) An arboreal population of the same species (pure stands),
- (B) Enough specimens for each age group,
- (C) A not affected area (at least in the last years) by substantial environmental disturbances (forest fires, pests or snow damages).

Crossing all GIS layers with these considerations, a representative sample forest was found in the *Sierra Calderona Natural Park* located in the region of Valencia, Spain. The chosen area, of approximately 20 hectares, contains pure stands of Aleppo pine trees. The trees clearly show that they belong to two different age classes, located very close to each other. These trees maintain the same edaphological conditions as well as insolation regime, orientation, and water availability. The two age classes are:

- (A) Young trees: about 26-year-old naturally regenerated stands originated after a forest fire in 1994.⁴²
- (B) Mature trees: even-aged pure stands, which were afforested around 50 years ago and survived forest fire of 1994.

The selected sample stand has an approximate size of 0.25 hectares and is located at latitude 39° 45' 28.80" N and longitude 0° 30' 36.36" W. Figure 1 shows the nature of the study area.

2.2 Selection of representative trees

In the selected sample stand, a total of 121 trees were inventoried. The main dendrometric parameters, i.e. diameter at breast height (DBH at 1.3 m)⁴³ and total tree height (h_t) have been measured. The results of this inventory are summarized in Table 1.

Following the recommendations of Fernández-Puratich,⁴⁴ Oliver-Villanueva⁴⁵ and Hapla,⁴⁶ we disregarded from the study those trees that: i) are located at the edge of the plot, ii) have grown with excessively braided shafts or iii) show affections of fungi or insects.

Furthermore, following the recommendations of Ríos-Rojas,²⁶ for a first phase of the study, we selected randomly different standard samples: two mature trees, two young trees and a standing dead tree. This phase was focussed on voltage and current measurements as a function of tree age.

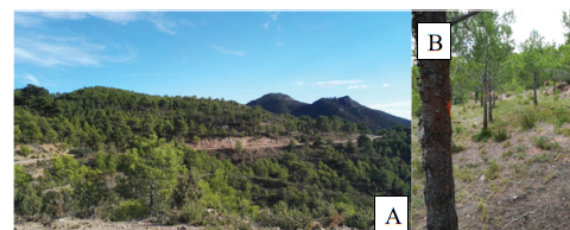


Figure 1. Study area location: (a) Panoramic view of the sample stand, (b) tree distancing in the sample stand.

Table 1. Dendrometric parameters of the tree population: breast-height diameter (DBH) and total tree height (ht).

	Breast-height diameter DBH [cm]	Total tree height h_t [m]
Mean	12.10	5.16
Median	11.10	5.13
Maximum	25.10	9.69
Minimum	6.4	2.77
Standard deviation	3.95	1.30
Variance	15.59	1.68
Number of samples	121	

In the second phase of the study, we conducted a statistical study to determine the population size following the methodology described by Hapla and Saborowski.⁴⁷ These authors made several measurements at different heights of the trees demonstrating that if the height and diameter of the trees do not differ more than a confidence interval the increasing number of samples does not improve the results significantly. For this phase, our tree population was reduced to 15 representative trees, to reach 95% confidence interval, considering the selection criteria used in different studies related to wood characteristics and physical properties of several tree species.^{45,46,48-52} The selected trees accomplish the following characteristics:

- (1) Height and diameter do not differ more than a standard deviation of the mean values.
- (2) Belong to KRAFT sociological class I (dominant trees) or class II (co-dominant trees).
- (3) Without significant or appreciable damage or disease present on the trunk.
- (4) Homogeneously distributed throughout the entire plot surface, to achieve a greater diversity of results.
- (5) Belong to the same age group and with enough level of electrical activity (measured in phase 1 of the study).

2.3 Measurement equipment

The electrical parameters were measured with a UT71D UNI-T multimeter with an input impedance of 2.5 G Ω , and an accuracy of 0.1% \pm 2 millivolts (mV), as it is used in other studies.^{53,54}

We used extracellular stainless-steel electrodes as in previous works.²³ To eliminate as far as possible the measurement overpotentials induced by the galvanic effect in bipolar measurements, we made sure that all our electrodes were manufactured with the same material.

We chose screws as the electrodes because they can easily be inserted into and extracted from trees, causing a small injury. Besides, because of their thread, screws have a larger contact surface area than smooth electrodes.

For the measurements, as a ground connection to the circuit, we used a titanium nitride-coated platinum-iridium alloy electrode (1999/5/EC).⁵⁵ Non-polarization electrodes were used as earth to minimize false results induced by the charges freely crossing over between the electrode–electrolyte interface following the experiences of Prutchi.⁵⁶ Each electrode was connected with the measuring equipment through an electrical connector and a 0.5 mm copper conductor cable insulated with a flexible plastic coating (CE 0123). Figure 2 shows the materials and equipment used.

2.4 Electrode placement and measurement

To record the voltage and short-circuit current (ISC) of the sample tree, electrodes were inserted directly into the trunk in contact with the phloematic tissue. This was ensured by inserting the electrodes using a torque wrench that allowed us to detect the change in hardness. According to other authors, phloem⁶ plays an active role in the electrical response of the

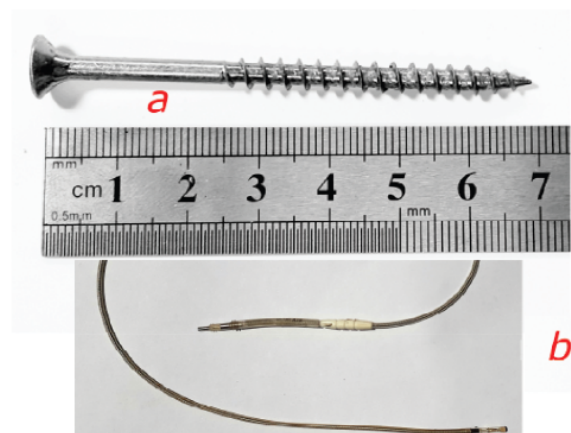


Figure 2. Equipment used for the measurement of the electrical signals (a) a 70 mm screw as an electrode, (b) an earth electrode.

trees. Oyarce⁶ demonstrated that the living cells that compose these areas offer lower resistance to the current flow in comparison with the rest of the tissues of the plant.

We placed the electrodes in a circular and longitudinal distribution to determine the distribution of the potential difference along the trunk of each tree. In the circular ring cuff configuration, the electrodes were placed at 1.5 m above the ground at the four cardinal compass points (north, east, south and west). Using the compass to select the orientation of the faces of the trees where the electrodes were inserted, as is shown in Figure 3 (left and middle). In the longitudinal configuration, the electrodes were longitudinally inserted into the trees every 50 cm, following a longitudinal line at the trunk's north face. Figure 3 (right) shows this setup. The low-polarization electrode was buried 15 cm into the ground, a minimum of 3 m away from the tree to use as ground or reference electrode.

The electrode placement used was the same in bipolar mode or referenced to the ground, changing only the electrodes connection. So, measurements referenced to the ground were carried out between each electrode concerning to the ground. On the other hand, bipolar measurements were made between two nearby electrodes, with a fixed separation of 0.5 m between them. The first level was from the electrode located at 0 m to 0.5 m, the next level was from 0.5 m to 1 m, continuing thus, up



Figure 3. Electrode placement using a compass (left), identification of trees and radially location of the electrodes (center), electrodes separated longitudinally (right).

e1795580-4 R. ZAPATA ET AL.



Figure 4. Electrode placement setup modes (left) measurements referenced to the ground, (right) bipolar setup.

to 3 m in height on the tree. Figure 4 shows a diagram of this configuration.

The setup used for the electrodes to measure the potential difference was the same for the total population of trees. Between 18th and 19th November 2017, continuous measurements were carried out during 24 hours, sampling data every hour. In this measurement session, we did not intend to observe a difference in behavior, it was only to obtain voltage values between the two age groups.

After obtaining the results of the preliminary phase of the study, the trees that formed the population for the second phase were selected, based on the observed results. The voltage and intensity began to be measured in the 15 selected trees that made up this representative population, analyzing the distribution of the electrical potential in the trees.

2.5 Experimental conditions

Data collection was performed through measurements by inserting electrodes into the trees. With the intention that our collected data were not affected by external variables, the following two premises were followed.

First, given that we caused a small injury in the trunks by inserting the electrodes, the trees responded by forming border areas and compartmentalization barriers to prevent infection and to resist the spread of wood decay.⁵⁷ Generally, within 24 days' post of the wound creation, an impervious boundary appears approximately 1 mm inside the wound surface.^{57,58} In conifer trees, the impermeability arises between 28 and 30 days after injury in these trees.⁵⁷ Following this, we carried out our study after leaving enough time for the generation of the boundary zone (necrofilactic periderm) of the tree bark.

Second, we have to address the fact that environmental conditions affect the behavior of the plant and generate changes in the electrical potential.^{26,29,59,60} To avoid that uncontrollable external factors that may influence our observations, we made the measurements of the fieldwork in days with similar air humidity and temperature, mainly in bright days without clouds. All measurements were made in the hour of zenith in the work area (between 1:30 pm and 2:00 pm CET). The decision to carry out the measurements at this time was based on the highest solar incidence, the lowest cloud presence and stable conditions.

2.6 Statistical analyzes

Each collected data of voltages and ISC were analyzed. We carried out normal distribution, homoscedasticity of variance

and ANOVA tests. In our case, to check if the data follows a normal distribution t-Student parametric test was applied. This allows evaluating the comparison between the two tree ages as well as between bipolar and referenced to the ground electrode configuration data (for two samples).

The concept of data homoscedasticity implies constancy in the variance of the errors, and it is used to guarantee a variable prediction by calculating the average value of its set.⁵⁹

An analysis of the variance (ANOVA) was performed with north, east, south, and west (N, E, S, W) orientation data (for three or more samples). Besides, the Kruskal–Wallis test and Mann–Whitney U test were applied to check the heterogeneity of data for two and three samples, respectively.

3. Results

3.1 Influence of tree age

Table 2 shows the obtained results for young and mature trees. Furthermore, this table also shows a significant influence of the tree age in the referenced to the ground measurements. Hence, there is a significant difference between the age groups (p -value < 0.0001) with an average voltage of 0.929 V in young trees and 0.238 V in mature trees. On the other hand, the bipolar measurements show an average voltage of 0.010 V and 0.014 V for young and mature trees, respectively. In bipolar measurements, the age difference does not show significant differences between groups (p -value = 0.45).

Figure 5 shows the main results obtained in 24 hours of referenced to the ground measurements. The average voltage in young trees is 0.383 V with a maximum value of 0.626 V. Mature trees show significantly lower values versus young trees (p -value < 0.0001) with an average voltage of

Table 2. Observations summary using different configurations over mature and young tree groups, volts as unit of measurement.

Measurement	Group	Max	Min	Mean	Std. Dev.
Referenced to the ground measurements	Young	-0.887	-1.016	-0.929	0.024
	Mature	-0.222	-0.261	-0.238	0.013
Bipolar	Young	0.033	0	0.010	0.008
	Mature	0.148	0	0.014	0.027
Mean of referenced to the ground measurements 24 h	Young	-0.223	-0.626	-0.383	0.100
	Mature	-0.012	-0.295	-0.150	0.073

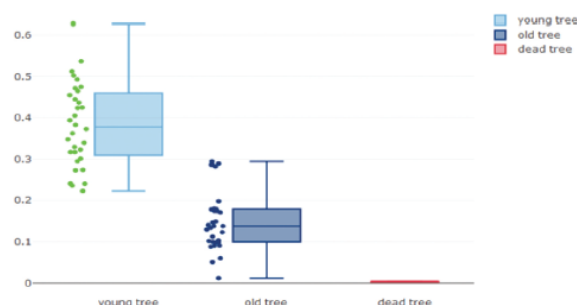


Figure 5. Boxplots presenting the data dispersion for young, old, and dead tree 24 h measurements. The median voltages measured significantly differed according to the tree age, young trees showing much higher values than older individuals.

0.150 V and a maximum value of 0.295 V. The control dead tree shows values of 0 V, as expected.

3.2 Influence of height

For the analysis of the longitudinal variation of the electric signals, only the young trees have been selected, since they show significantly higher values in the voltage measurements as the older trees.

3.2.1 Referenced to the ground measurements

Figure 6 and Table 3 show values very constant at every height level. With a maximum voltage value of 0.626 V measured at ground level and a minimum value of 0.597 V at 2.5 m. The ISC show values even closer to each other than the voltage, with a maximum ISC value of 0.568 μA at 0 m and a minimum value of 0.519 μA measured at 2.5 m.

Analyzing the data obtained, we found significant differences neither in voltage (p -value = 0.86) nor in ISC (p -value = 0.91) among the different height levels. Therefore,

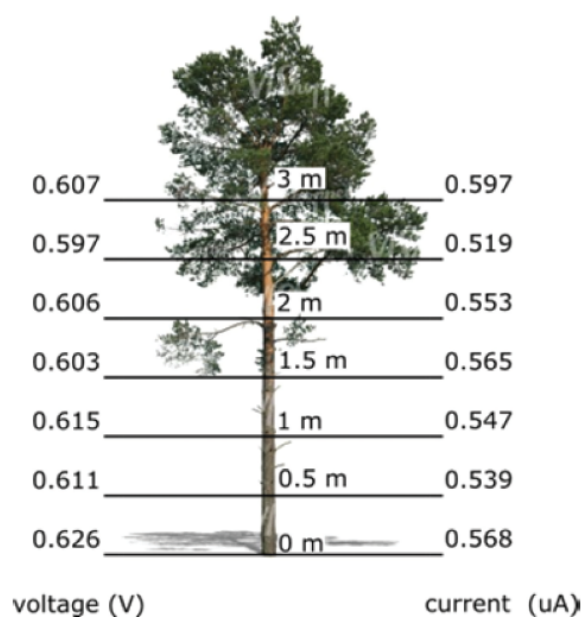


Figure 6. Monopolar referenced to the ground measurements for voltage and current considering the height at the tree.

Table 3. Statistical mean and variance of referenced to the ground measurements for voltage and current considering the height at the tree.

Height (m)	Voltage (V)		ISC (μA)	
	Mean	Variance	Mean	Variance
0.0	-0.626	0.011	-0.568	0.027
0.5	-0.611	0.008	-0.539	0.038
1.0	-0.615	0.005	-0.547	0.023
1.5	-0.603	0.006	-0.565	0.023
2.0	-0.606	0.003	-0.553	0.027
2.5	-0.597	0.005	-0.519	0.022
3.0	-0.607	0.004	-0.597	0.021

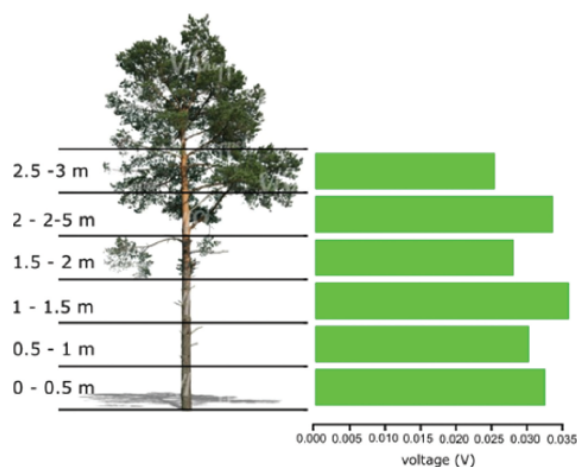


Figure 7. Bipolar voltage measurements considering the height at the tree.

Table 4. Statistical mean and variance of bipolar voltage measurements considering height at the tree.

Height (m)	Voltage (V)		ISC (μA)	
	mean	Variance	mean	Variance
0.0-0.5	0.032	0.001	0.471	0.164
0.5-1.0	0.030	0.001	0.427	0.062
1.0-1.5	0.036	0.001	0.441	0.068
1.5-2.0	0.028	0.000	0.263	0.091
2.0-2.5	0.033	0.001	0.218	0.060
2.5-3.0	0.025	0.001	0.332	0.269

the measurement height shows no influence on the voltage or ISC referenced to the ground measurements.

3.2.2 Bipolar measurements

Both the voltage and the ISC show very close values between each height level for bipolar measurements. As can be seen in Figure 7 and Table 4, the highest values for voltage mean have been obtained between 1 m to 1.5 m above the ground (0.036 V) and the minimum values at 2.5-3.0 m (0.025 V). On the other hand, the maximum values for ISC were measured between 0.0 m to 0.5 m (0.471 μA) and the minimum values at 2.0-2.5 m (0.218 μA).

Nevertheless, the slight differences observed are not significant among levels of height, neither for voltage (p -value = 0.517) nor for ISC (p -value = 0.248).

3.3 Influence of orientation

Very similar values and no significant differences can be found among the cardinal point placement of the electrodes (p -value = 0.871), as can be observed in Figure 8. However, it is necessary to point out that a tiny significant difference was detected only for ISC between the east and the other cardinal points (p -value = 0.048). It was decided to continue to obtain data in order to analyze more in detail the possible influence of orientation on ISC. Thus, three other measurements were carried out on 21st April 5th and 12th May 2018. None of them showed statistically significant differences, neither for

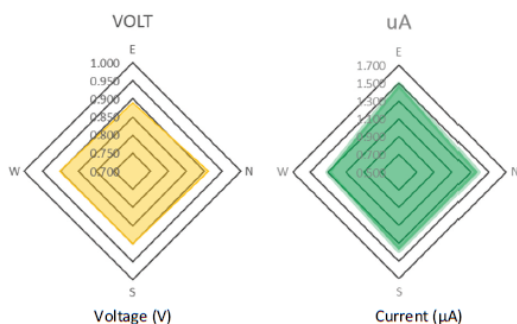


Figure 8. Average values for voltage and electrical current in function on the cardinal orientation.

Thus, the difference between the means is much smaller with an average of 0.597 µA for the referenced to the ground measurement and 0.471 µA for the bipolar measurement. However, these small differences are statically significant ($p < .001$).

4. Discussion

The first result to consider is the observation of a negative electric potential difference of the tree with respect to the ground. This observation is consistent with the different authors who have studied the voltage in several tree species.^{6,21,23,33} Regarding the direction of ISC, Le Mouél²⁹ concludes on the presence of positively charged islands that produce a reversal of current flow. During the fieldwork for this research, we have not

Table 5. Statistical mean and variance of voltage measurements referenced to the ground considering orientation at the tree.

	Voltage (V)				ISC (µA)			
	E	N	S	W	E	N	S	W
21/04/2018								
Min	-0,828	-0,864	-0,864	-0,833	-1,830	-1,540	-1,670	-1,430
Max	-1,109	-1,125	-1,109	-1,114	-5,100	-4,760	-4,660	-4,660
Mean	-1,014	-1,033	-1,026	-1,025	-3,411	-3,126	-3,173	-2,860
Variance	-0,007	-0,008	-0,007	-0,006	-0,008	-1,001	-0,874	-1,033
05/05/2018								
Min	-0,713	-0,715	-0,706	-0,703	-0,350	-0,370	-0,030	-0,370
Max	-1,017	-1,032	-0,998	-1,015	-1,470	-1,610	-1,530	-1,610
Mean	-0,876	-0,900	-0,877	-0,886	-0,871	-0,876	-0,817	-0,880
Variance	-0,001	-0,001	-0,001	-0,001	-0,012	-0,011	-0,011	-0,012
12/05/2018								
Min	-0,742	-0,756	-0,747	-0,741	-0,010	0,000	-0,010	-0,010
Max	-0,841	-0,852	-0,852	-0,838	-0,310	-0,310	-0,290	-0,310
Mean	-0,780	-0,802	-0,791	-0,793	-0,167	-0,141	-0,154	-0,152
Variance	-0,012	-0,015	-0,012	-0,012	-0,132	-0,137	-0,173	-0,154

voltage nor for ISC, as can be seen in Table 5. Consequently, these additional measurements ruled out a possible influence of orientation on voltage and ISC.

3.4 Optimal electrode configuration

The results confirm significant differences (p -value < 0.001) in the data obtained according to electrode configuration, either referenced to the ground or bipolar. Figure 9 shows this result graphically.

The obtained results demonstrate that the measured voltage values show a clear and significant difference between the electrode configurations, with an average value of 0.626 V for the referenced to the ground measurement and a value of 0.036 V for the bipolar measurement. On the other hand, the observed values for ISC show smaller differences than for the voltage (see Figure 9).

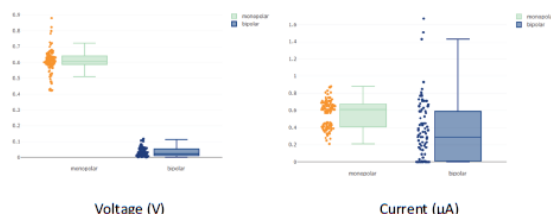


Figure 9. Significant differences between the bipolar and referenced to the ground configurations in terms of voltage (left) and ISC (right) (p -value < 0.0001).

been able to observe any reversal of the current direction. However, as mentioned in the materials and methods section, the different sets of measurements were made under meteorological conditions that were as similar as possible.

Moreover, the results indicate that the age of Mediterranean pines has a direct influence on the electrical potential, since young pines present a significantly higher voltage than mature trees (0.92 V and 0.24 V, respectively). Besides laboratory or nursery research,^{6,24-26} there are research activities that were carried out with trees in the natural environment, but those activities were performed with a single tree. Thus, e.g., Cardoso²⁷ analyzes the electrical signals of a eucalyptus tree (*Eucalyptus globulus*) with a height of 15 m and a diameter at breast height of 45 cm. Although the age of the tree was omitted, we concluded that they were done on mature trees considering the specified tree dimensions. The same happens in other works.^{23,30-33}

Additionally, when comparing the voltage values obtained by these authors with ours, they are close to those obtained with our sample of mature trees. Furthermore, the results obtained in our research on the electric signal difference between young and mature trees could be compared with other research related to physiological changes and age in trees. Thus, for example, Sellin⁶¹ observes that the sapwood thickness, in which the physiological activity is concentrated, decreases its relative proportion when the trees' age. Also, Rosenvald⁶² demonstrates that the main functional parameters

for the tree's mineral nutrition decrease as the age of the trees increases, reverting a behavior similar to the *Pinus halepensis* volumetric increase functions developed and published by Montero.⁶³

Furthermore, the results indicate that both voltage and ISC measurements show uniform distribution patterns in the trunks. Consequently, the measurement does not vary depending on the height or orientation positioning of the electrode in the trunk. Le Mouel²⁹ shows a slight tendency to increase the voltage values with increasing electrode positioning height at the trunk. However, it should be borne in mind that this research was only carried out on a single tree. Our research cannot verify this presumed increase either in bipolar or referenced to the ground measurements. Thus, in the same way that we have been able to demonstrate with the results obtained in our research, Gibert²³ and Love²⁰ do not observe significant differences between the measurement of voltage at different heights of the electrode's position in the trunk xylem respecting to the ground. Furthermore, our mean voltage values obtained are in the same order of magnitude as those of the literature consulted,^{20,23} despite the fact that these authors carried out their work outside and under laboratory conditions, respectively. Thus, in accordance to Gibert,²³ we can discard the assumption of the electrokinetic theory as a generator of the difference in electrical power in trees. According to the electrokinetic theory, the electric field would be proportional to the pressure gradient,⁶⁴ which transferred to a plant, would be the flow of sap per unit area. Therefore, this theory would imply a linear increase in the amplitude of the electrical potential with the height in the trunk, at least on average.

In the case of the electrode placement depending on the orientation, our voltage results also coincide with those obtained by other authors,^{20,33} which were obtained in measurements on individual trees. The values of current in short-circuit ISC are presented in only one work,²⁰ instantaneous current in short-circuit ISC values shown there are quite similar to our registered values. However, the distribution of the ISC is not mentioned. Since the voltage distribution is homogeneous, we expected the same with ISC, so we have not arguments against the hypothesis that the distribution of the ISC should behave differently.

In conclusion, the electrical current and voltage do not vary depending on the measurement height or the orientation of the electrode, which reduces the difficulty of fieldwork to collect data, expanding the possibilities of installation of measurement equipment. Furthermore, the use of young trees in ground-referenced measurements gives the possibility of working with higher value electrical signals. All this will allow us to optimize the placement of the measurement electrodes in the trees depending on the circumstances. And it also allows us to consolidate the knowledge of how static factors influence the measurement of electrical signals.

Consequently, this allows us the opportunity to continue researching the dynamic behavior of electrical signals on a population of *Pinus halepensis* in a Mediterranean ecosystem. We plan to evaluate the influence of other factors such as the trees' cycle variations (daily, monthly and annual) or even the different characteristic meteorological variables of the Mediterranean climate. The present and future works will be

the basis for the use of measurable electrical signals in trees as a means of indicating the state of individual trees and forest mass.

We work with long-term objective of developing low-cost and easy-to-use devices that could be integrated with other sensing technologies and would allow more accurate and correct decision-making in forest planning and management through constant monitoring of trees.





Geolocation information

Datum:	ETRS89N	
Latitude:	39° 45'	28.80" N
Longitude:	0° 30'	36.36" W
UTM zone:	30	
Coord. X:	713.297,97	
Coord. Y:	4.403.863,10	

Disclosure of interest

The authors report no conflict of interest.

ORCID

Rodolfo Zapata  <http://orcid.org/0000-0002-3601-9681>
 Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga  <http://orcid.org/0000-0002-6361-6019>
 Jorge E. Luzuriaga  <http://orcid.org/0000-0002-9040-5954>
 Miguel A. Mateo Pla  <http://orcid.org/0000-0002-8059-6996>

References

- Burdon-Sanderson JS. Note on the electrical phenomena which accompany irritation of the leaf of *Dionaea muscipula*. *Proc R Soc London*. 1873;21:495–496.
- Darwin C. *Insectivorous plants*. New York (NY): D Appleton & Company; 1875. doi:10.5962/bhl.title.99933.
- Bose JC. *Nervous mechanism of plants*. New York (NY): Longmans, Green and Co.; 2011. doi:10.5962/bhl.title.139322.
- Pickard BG. Action potentials in higher plants. *Bot Rev*. 1973;39:172–201.
- Wright JP, Fisher DB. Measurement of the sieve tube membrane potential. *Plant Physiol*. 1981;67(4):845–848. doi:10.1104/PP.67.4.8456.
- Oyarce P, Gurovich L. Electrical signals in avocado trees: responses to light and water availability conditions. *Plant Signal Behav*. 2010;5(1):34–41. doi:10.4161/psb.5.1.10157.
- Datta P, Palit P. Relationship between environmental factors and diurnal variation of bioelectric potentials of an intact jute plant. *Curr Sci*. 2004;87:680–683.
- Gurovich LA, Hermosilla P. Electric signalling in fruit trees in response to water applications and light–darkness conditions. *J Plant Physiol*. 2009;166(3):290–300. doi:10.1016/j.jplph.2008.06.004.
- Rhodes JD, Thain JF, Wildon DC. The pathway for systemic electrical signal conduction in the wounded tomato plant. *Planta*. 1996;200(1):50–57. doi:10.1007/BF00196648.
- Volkov AG, Adesina T, Jovanov E. Closing of Venus flytrap by electrical stimulation of motor cells. *Plant Signal Behav*. 2007;2(3):139–145. doi:10.4161/psb.2.3.4217.
- Pyatygin SS, Opritov VA, Vodenev VA. Signaling role of action potential in higher plants. *Russ J Plant Physiol*. 2008;55(2):285–291. doi:10.1134/S1021443708020179.

12. Brenner ED, Stahlberg R, Mancuso S, Vivanco J, Baluška F, Van Volkenburgh E. Plant neurobiology: an integrated view of plant signaling. *Trends Plant Sci.* 2006;11(8):413–419. doi:10.1016/j.tplants.2006.06.009.
13. Zimmermann MR, Maischak H, Mithöfer A, Boland W, Felle HH. System potentials, a novel electrical long-distance apoplastic signal in plants, induced by wounding. *Plant Physiol.* 2009;149(3):1593–1600. doi:10.1104/pp.108.133884.
14. Schaller A, Oecking C. Modulation of plasma membrane H⁺-ATPase activity differentially activates wound and pathogen defense responses in tomato plants. *Plant Cell.* 1999;11(2):263–272. doi:10.2307/3870855.
15. Fromm J, Lautner S. Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant Cell Environ.* 2007;30(3):249–257. doi:10.1111/j.1365-3040.2006.01614.x.
16. Gelli A, Higgins VJ, Blumwald E. Activation of plant plasma membrane Ca²⁺-permeable channels by race-specific fungal elicitors. *Plant Physiol.* 1997;113(1):269–279. doi:10.1104/pp.113.1.269.
17. Stankovic B, Zawadzki T, Davies E. Characterization of the variation potential in sunflower. *Plant Physiol.* 1997;115(3):1083–1088. doi:10.1104/pp.115.3.1083.
18. Mwesigwa J, Collins DJ, Volkov AG. Electrochemical signaling in green plants: effects of 2, 4-dinitrophenol on variation and action potentials in soybean. *Bioelectrochemistry.* 2000;51(2):201–205. doi:10.1016/S0302-4598(00)00075-1.
19. Sukhova E, Akinchits E, Sukhov V. Mathematical models of electrical activity in plants. *J Memb R Biol.* 2017;250(5):407–423. doi:10.1007/s00232-017-9969-7.
20. Love CJ, Zhang S, Mershin A. Source of sustained voltage difference between the xylem of a potted *Ficus benjamina* tree and its soil. *PLoS One.* 2008;3:8.
21. Gora EM, Yanoviak SP. Electrical properties of temperate forest trees: a review and quantitative comparison with vines. *Can J For Res.* 2015;45(3):236–245. doi:10.1139/cjfr-2014-0380.
22. Horwitz W. The theory of electrokinetic phenomena. *J Chem Educ.* 1939;16(11):519. doi:10.1021/ed016p519.
23. Gibert D, Le Mouél JL, Lambs L, Nicollin F, Perrier F. Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk. *Plant Sci.* 2006;171(5):572–584. doi:10.1016/j.plantsci.2006.06.012.
24. Gil PM, Gurovich L, Schaffer B. The electrical response of fruit trees to soil water availability and diurnal light-dark cycles. *Plant Signal Behav.* 2008;3(11):1026–1029. doi:10.4161/psb.6786.
25. Gil PM, Gurovich L, Schaffer B, García N, Iturriaga R. Electrical signaling, stomatal conductance, ABA and ethylene content in avocado trees in response to root hypoxia. *Plant Signal Behav.* 2009;4(2):100–108. doi:10.4161/psb.4.2.7872.
26. Ríos-Rojas L, Morales-Moraga D, Alcalde JA, Gurovich LA. Use of plant woody species electrical potential for irrigation scheduling. *Plant Signal Behav.* 2015;10(2):e976487. doi:10.4161/15592324.2014.976487.
27. Cardoso SS, Carrondo LB, Marques JM, Narciso PN, Rocha MJ, Rodrigues IN, Soares A. (2004). Monitorization of the electrical signal generated by a tree. February 2004 – 4th luso-spanish assembly on geodesy and geophysics.
28. Koppán A. Measurement of electric potential difference on trees. *Acta Biologica Szegediensis.* 2002;46:37–38.
29. Le Mouél JL, Gibert D, Poirier JP. On transient electric potential variations in a standing tree and atmospheric electricity. *C R Geosci.* 2010;342(2):95–99. doi:10.1016/j.crte.2009.12.001.
30. Morat P, Le Mouél JL, Granier A. Electrical potential on a tree. A measurement of the sap flow? *Comptes rendus de l'Académie des sciences Série 3, Sciences de la vie.* 1994;317:98–101.
31. Gindl W, Loppert HG, Wimmer R. Relationship between streaming potential and sap velocity in *Salix Alba* L. *PHYTON-HORN.* 1999;39:217–224.
32. Koppán A, Szarka L, Wesztergom V. Temporal variation of electrical signal recorded in a standing tree. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica.* 1999;34:169–180.
33. Koppán A (2004). Variations of the natural electric potential differences occurring on tree trunks and their relationship with the xylem sap flow. PhD Thesis. University of West Hungary. Sopron, Hungary.
34. Volkov AG, Ranatunga DRA. Plants as environmental biosensors. *Plant Signal Behav.* 2006;1:105–115.
35. AAVV. (2008). Distribution map of Aleppo pine. EUFORGEN 2009. [Retrieved 2020 July 16]. www.euforgen.org
36. De Luis M, Čufar K, Di Filippo A, Novak K, Papadopoulos A, Piovesan G, Smith KT. Plasticity in dendroclimatic response across the distribution range of Aleppo pine (*Pinus halepensis*). *PLoS One.* 2013;8:12. doi:10.1371/journal.pone.0083550.
37. Fadi B, Semerci H, Vendramin GG. 2003. EUROFORGEN technical guidelines for genetic conservation and use for Aleppo pine (*Pinus halepensis*) and brutia pine (*Pinus brutia*). IPGRI, International plant genetic resources institute. Rome (Italy). p. 6. ISBN 92-9043-571-2.
38. Mauri A, Di Leo M, de Rigo D, Caudullo G. 2016. *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayaz J, de Rigo D, Caudullo G, Houston Durrant T, Mauri A, editors. *European Atlas of Forest TreeSpecies*. Publ. Off. EU, Luxembourg. p. e0166b8+.
39. Pausas JG, Ribeiro E, Vallejo R. Post-fire regeneration variability of *Pinus halepensis* in the eastern Iberian Peninsula. *For Ecol Manage.* 2004;203(1–3):251–259. doi:10.1016/j.FORECO.2004.07.061.
40. IFN3. Tercer inventario forestal nacional (3rd National Forest Inventory of Spain). Ministerio para la Transformación Ecológica y el Reto Demográfico; Spain, 2007. [Retrieved 2020 July 16] <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>
41. Linán ID, Gutiérrez E, Heinrich I, Andreu-Hayles L, Muntán E, Campelo F, Helle G. Age effects and climate response in trees: a multi-proxy tree-ring test in old-growth life stages. *Eur J For Res.* 2012;131:933–944.
42. Moliner JIU. Análisis del régimen de incendios forestales en los montes de Portaceli durante el siglo XX (Serra, Valencia). *Cuadernos De Geografía.* 2004;76:50–59.
43. Saket M, Alttrell D, Vuorinen P, Dalsgaard S, Andersson, National forest inventory (field manual template) The Forest Resources Assessment (FRA), <http://www.fao.org/3/ae578e/AE578E06.htm>.
44. Puratich F, Wilson H (2013). *Valorización integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal en condiciones mediterráneas* (Doctoral dissertation).
45. Oliver-Villanueva JV, Becker G. Verwendungsrelevante Holzigenschaften der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und ihre Variabilität im Hinblick auf Alter und Standraum. *Forst und Holz.* 1993;48:387–391.
46. Hapla F, Oliver-Villanueva JV, González-Molina JM. Effect of silvicultural management on wood quality and timber utilisation of *Cedrus atlantica* in the European Mediterranean area. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 2000;58(1–2):1–8. doi:10.1007/s001070050377.
47. Hapla F, Saborowski J. Planning of sample size for wood anatomical investigations. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 1987;45:141–144.
48. Seeling U, Sachsse H (1991). *Abnorme Kambildung bei Rotbuche und ihr Einfluß auf holzbiologische und holztechnologische Kenngrößen [Abnormal heartwood formation in beech and its influence on the biological and technological features of the wood]* (Doctoral dissertation, Doctoral thesis, 2nd).
49. Sauter U. Technologische Holzigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) als Ausprägung unterschiedlicher Wachstumsbedingungen. Freiburg i. Breisgau, Germany, 1992.
50. Dix B, Roffael E, Becker G, Gruss K. Properties of pulps prepared from poplar wood of different clones, sites and ages. *Papier.* 1992;46:583–592.
51. Wobst J (1995). *Auswirkungen von Standortwahl und Durchforstungsstrategie auf verwertungsrelevante Holzigenschaften*

- der Douglasie (Pseudotsuga menziesii (Mirb. (Franco)) (Doctoral dissertation). UNIVERSITY OF GÖTTINGEN.*
52. Peters S (1996). *Untersuchungen über die Holzeigenschaften der Stieleiche (Quercus robur L.) und ihre Beeinflussung durch die Bestandesdichte*. Papierflieger, UNIVERSITY OF GÖTTINGEN.
 53. Krcmar P, Kuritka I, Maslik J, Urbanek P, Bazant P, Machovsky M, Merka P. Fully inkjet-printed cuo sensor on flexible polymer substrate for alcohol vapours and humidity sensing at room temperature. *Sensors*. 2019;19(14):3068. doi:10.3390/s19143068.
 54. Wang K, Zhang S. Extracellular electron transfer modes and rate-limiting steps in denitrifying biocathodes. *Environ Sci Pollut Res*. 2019;26(16):16378–16387. doi:10.1007/s11356-019-05117-x.
 55. DIRECTIVE 1999/5/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 9 March 1999.
 56. Prutchi D, Norris M. Design and development of medical electronic instrumentation. Hoboken (New Jersey): John Wiley & Sons; 2004. p. 326–334. doi:10.1002/0471681849.
 57. Woodward S, Pearce RB. The role of stilbenes in resistance of Sitka spruce (*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) to entry of fungal pathogens. *Physiol Mol Plant Pathol*. 1988;33(1):127–149. doi:10.1016/0885-5765(88)90049-5.
 58. Mullick DB. A new tissue essential to necrophyllactic periderm formation in the bark of four conifers. *Can J Bot*. 1975;53(21):2443–2457. doi:10.1139/b75-271.
 59. Abbott DT, Crossley DA Jr. Woody litter decomposition following clear-cutting. *Ecology*. 1982;63(1):35–42. doi:10.2307/1937028.
 60. Fensom DS. The bioelectric potentials of plants and their functional significance: V. Some daily and seasonal changes in the electrical potential and resistance of living trees. *Can J Bot*. 1963;41(6):831–851. doi:10.1139/b63-068.
 61. Sellin A. Variation in sapwood thickness of *Picea abies* in Estonia depending on the tree age. *Scand J For Res*. 1991;6(1–4):463–469. doi:10.1080/02827589109382683.
 62. Rosenvald K, Ostonen I, Uri V, Varik M, Tedersoo L, Lohmus K. Tree age effect on fine-root and leaf morphology in a silver birch forest chronosequence. *Eur J For Res*. 2013;132(2):219–230. doi:10.1007/s10342-012-0669-7.
 63. Montero G, Cañellas I, Ruiz-Peinado R. Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. *For Syst*. 2002;10:179–201.
 64. Delgado ÁV, González-Caballero F, Hunter RJ, Koopal LK, Lyklema J. Measurement and interpretation of electrokinetic phenomena. *J Colloid Interface Sci*. 2007;309(2):194–224. doi:10.1016/j.jcis.2006.12.075.

12. ANEXO II



Plant Signaling & Behavior



ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/kpsb20>

Seasonal variations of electrical signals of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions

Rodolfo Zapata, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga, David Fuente, Miguel A. Mateo Pla, Jorge E. Luzuriaga & Juan Carlos Moreno Esteve

To cite this article: Rodolfo Zapata, Jose-Vicente Oliver-Villanueva, Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga, David Fuente, Miguel A. Mateo Pla, Jorge E. Luzuriaga & Juan Carlos Moreno Esteve (2021): Seasonal variations of electrical signals of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions, *Plant Signaling & Behavior*, DOI: [10.1080/15592324.2021.1948744](https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1948744)

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/15592324.2021.1948744>



Published online: 09 Jul 2021.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)

Full Terms & Conditions of access and use can be found at
<https://www.tandfonline.com/action/journalInformation?journalCode=kpsb20>

RESEARCH PAPER



Seasonal variations of electrical signals of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions

Rodolfo Zapata ^a, Jose-Vicente Oliver-Villanueva ^a, Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga ^a, David Fuente ^a, Miguel A. Mateo Pla ^a, Jorge E. Luzuriaga ^a, and Juan Carlos Moreno Esteve ^b

^aITACA - Institute of Information and Communication Technologies, Universitat Politècnica De València, València, Spain; ^bApplied Physics Department, Universitat Politècnica De València, València, Spain

ABSTRACT

The temporal evolution of the electrical signal generated by *Pinus halepensis* was measured in a sample of 15 trees. Weekly experiments were carried out during a long-term campaign lasting over a year, while trials with a high frequency of measurements were also performed during several days. In the latter case, day-night oscillations of the electrical magnitudes were observed. Additionally, punctual meteorological events such as rainfall and electrical storms affect the electrical signal as well.

The measured electrical intensity grows exponentially with the voltage. In fact, no electrical intensity that exceeds the threshold of 0.01 μA is gathered when voltage values are lower than 0.6 V. In general, higher electrical signals were gathered during the rainy seasons with moderate temperatures; while very low signals, including few measures of zero intensity, were obtained during the most stressful periods over the year, mainly by mid-summer.

There is a strong correlation between the rainfall and the electrical signal. The rain-intensity correlation, together with sustained intensity values during the reproductive period in spring, suggests that this electrical magnitude could be an indicator of the physiological state of the tree and thus used for in situ and minimally invasive forest monitoring.

ARTICLE HISTORY

Received 5 May 2021
Revised 22 June 2021
Accepted 23 June 2021

KEYWORDS

Electrical signals; plant electrophysiology; voltage; short-circuit current; *Pinus halepensis*; Mediterranean forests; seasonal variation; climatic conditions; bushfire risk

1 Introduction

The Mediterranean climate has never been benign for most tree species due to its long drought periods, torrential rains and extreme temperatures in summer,¹ which facilitate bushfire ignition.² However, many plants have adapted to these conditions and supported the establishment of ecosystems with a great biodiversity.³



In the current framework of climate change, Mediterranean climate areas are vulnerable to a decrease in precipitation, a plausible scenario over the next few decades, as the atmospheric circulation models predict.⁴ This is a global challenge because these regions (Australia, Southern Africa, Chile, California and the Mediterranean basin) are present in every continent and they are densely populated.

According to Gracia,⁴ a rainfall reduction of 10% is expected in the Iberian Peninsula over the upcoming 50 years, as well as a decrease of 25% of soil's water content. Reduction in the soil's water reserve is a consequence of the increase in the rate of trees' transpiration during the vegetative period and the greater evaporative demand of the atmosphere.⁴ The phytosanitary status of trees in Mediterranean climate zones is associated both with the characteristic climate fluctuations and with other ecological processes⁵ such as outbreaks of fire.⁶ In a climate change context, bushfire recurrence is enhanced in terms of intensity and frequency⁵ by the temporary weakness of many trees.⁷ Therefore, the early detection of weakened trees

that do not display visible symptoms of disease yet, could represent a significant advancement in the planning of forest health management.⁵

Remarkably, the existence of a continuous electrical potential between the electrodes inserted in the tree's phloem and the surrounding soil was discovered.⁸ Additionally, it was recently documented that different environmental stimuli also produce electrical signal changes.⁹ Further, according to some authors^{10–15} the variation of electrical signals in response to the stimulus depends on the intensity of the stimulation.

This behavior has been studied by other authors in research laboratories under controlled conditions.^{13–16} This characteristic of the electrical signals could be used as an element for monitoring the state of the trees inside their ecosystem under natural conditions. Despite the different investigations carried out, it still remains unclear which environmental factors have the greatest influence on the tree's electrical signals. Few published works have studied the electrical signals of trees in controlled conditions and only for continental and Central European climatic areas, e.g., *Aesculus hippocastanum*¹⁷ and *Populus nigra*¹² both in France, *Salix alba* in Austria,¹⁸ *Quercus spp.* and *Fagus sylvatica*.^{19,20} Thus, to the best of our knowledge, any prior research which has addressed this topic under field conditions neither studied the electrical response of trees located in highly vulnerable ecosystems to climate change such as Mediterranean forests.

CONTACT Rodolfo Zapata  rozaza@upv.es  ITACA - Institute of Information and Communication Technologies, Universitat Politècnica De València, València, Spain

© 2021 Taylor & Francis Group, LLC

Fritts²¹ affirms that trees growing in extreme conditions, such as Mediterranean ecosystems, respond more clearly to climatic variations. Consequently, the Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) is an interesting species for monitoring environmental changes because it is very well adapted to drought and its growth is highly related to the water supply.²² In addition, *Pinus halepensis* is a pioneer species that is expanding strongly on the two banks of the Mediterranean basin²³ due to its high potential for natural regeneration after bushfires and also due to its ability to rapidly colonize abandoned agricultural lands.²⁴

In summary, the current and voltage values rely on the tree's physiological state^{25–30} and thus, both electrical signal components could be robust indicators of the forest health under different environmental conditions and consequent vulnerabilities: growth potential, hydric stress, bushfire risk and pests, among others.

In a previous study, we analyzed the most significant static factors influencing *Pinus halepensis* populations,³¹ i.e. experiments carried out for a short period of time at stable climatic conditions. We observed that the tree age significantly influences the measured electrical potential, obtaining higher values in young trees. Furthermore, we conclude that the amplitude of the electrical signals does not depend on the location of the electrode. Both components of the electrical signal (the potential difference and the ISC) are constant, regardless of the orientation and height at which the measurement electrode is inserted into the tree.

Based on this acquired knowledge, the aim of this research is to analyze the temporal evolution of the electrical signal of a representative group of *Pinus halepensis* in Mediterranean forest. Indeed, this is the first study researching the electrical behavior of a representative sample of trees in natural conditions and it is also pioneering in measuring the electric intensity generated by a tree. The chosen pine is a paradigmatic Mediterranean species that quickly responds to climatic variations, and hence, it is a representative object of research. Regarding the experimental planning, the electrical measurements with a higher sample frequency were carried out for a period of several days, while the long-term trials were performed for a campaign lasting more than one year. In summary, the main objective of this work is to detect and analyze the seasonal but also day-night variations of electrical signals of *Pinus halepensis* in a Mediterranean ecosystem.

2 Material and methods

Both components of the electrical signal, voltage and current,³² were measured in two different data acquisition experiments, one for short, the other for long periods. In the first trial, data were recorded with a weekly resolution to assess the electrical signal evolution throughout the annual vegetative cycle. In the other experimental set-up, signal values were obtained each minute over several consecutive full days. In this way, we can observe the short-term changes in voltage and current along the day-night cycles in different stages of the pine vegetative cycle.

2.1 Selection of representative species and forest

As in our previous work,³¹ *Pinus halepensis* is the selected arboreal species on which the measurement of the electrical

signals has been carried out because it is a representative coniferous, native to the Mediterranean region and present in almost all regions of both banks of the Mediterranean basin.^{33–39} Moreover, *Pinus halepensis* presents clear relationships between growth and climatic variables. Thus, it is a reliable species for dendroclimatological studies.²² Different studies for the Iberian Peninsula^{40,41} suggest that the growth series reflect a strong influence of climatic factors, with a higher sensitivity than that observed in other *Pinus* species such as *Pinus sylvestris*, *Pinus nigra*, *Pinus pinaster* and *Pinus mugo*. Thus, understanding the impact of different environmental factors on the electrical response of this species may be of interest to the scientific community.²²

In our previous work, it was found that the amplitude of the signal is significantly greater in younger trees than in mature ones.³¹ For this reason and to facilitate the measurement of the electrical signal, it was decided to look for a forest that had enough young trees within an area not affected by significant environmental disturbances such as recent bushfires, pests or damage due to heavy snowfall. Therefore, we decided to use a natural regenerated forest located within the protected area of the Sierra Calderona Natural Park in the Region of Valencia, Spain. The selected sample stand has an approximate size of 0.25 hectares and is located at latitude 39° 45' 28.80" N and longitude 0° 30' 36.36" W. The age of the trees is in average 27 years. The mean breast height diameter is 12.10 cm and the mean height 5.16 m. The stock density is 484 trees/ha.

2.2 Electrodes

Two model electrodes were used according to their function, a stainless steel for the tree and a platinum-iridium for the ground.^{12,16,31,42,43} We inserted the stainless-steel electrode directly at 1.5 m above the ground into the trunk to be in contact with the phloematic tissue. We chose stainless steel screws as electrodes because they can be easily inserted and removed from trees, causing only a minor wound. Additionally, the screws have a greater contact surface with respect to the smooth electrodes due to their thread. The contact with the phloematic tissue was ensured by inserting the electrodes with a torque wrench that allowed us to detect the change in hardness of the tissue and to cross the phloematic tissue. The latter action is fundamental since electrical signals are transmitted more easily along this tissue, given its lower resistance to electrical flow, compared to other plant tissues.⁹

The second type of electrode was a non-polarization titanium-nitride-coated platinum-iridium alloy electrode (1999/5/EC)⁴⁴ and was used as ground reference. Due to the hardness of the soil, this electrode was buried 15 cm in the mineral soil, discarding the centimeters of topsoil, at a minimum distance of 3 m from the tree.

Both electrodes were connected with the measuring equipment through an electrical connector and a 0.5 mm copper conductor cable insulated with a flexible plastic coating (CE 0123).

2.3 Measures for the long-term evolution

The long-term experimental design was based on the knowledge acquired for individual hardwoods^{10,12,19} and on our

previous experience with *Pinus halepensis*.³¹ This trial aims to observe the electrical signal evolution within the group of selected pines throughout their annual vegetative cycle.

2.3.1 Procedure

Voltage (V) and short-circuit current (ISC) data were collected at the same solar time once every Monday for 16 months, between May 28th 2018 and September 30th 2019, comprising more than a complete vegetative cycle. Four values (one for each cardinal point) of each component of the electrical signal and for each of the 15 representative specimens of the study population were recorded, i.e., 60 measurements every week.

2.3.2 Measurement equipment and external data sources

Voltage and current values were measured with a UT71D UNI-T multimeter with an input impedance of 2.5 G Ω and an accuracy of 0.1% \pm 2 millivolts (mV).

Meteorological data of the area were provided by a professional weather station installed in 39° 46' 10.12" N, 00° 31' 14.19" W, located very close to the research plot. The weather station is a Davis Vantage VUE model owned by the Valencian Association of Meteorology 'Josep Peinado' (AVAMET).⁴⁵ The meteorological variables to be correlated

with the electrical signal components are the temperature, relative air humidity, atmospheric pressure, wind speed and precipitation. For simplicity, the daily mean of the collection day was used. For the rainfall amount, the accumulated weekly precipitation was assumed.

2.3.3 Trees selection

15 trees of a forest population of *Pinus halepensis* were selected following the method described by Hapla and Saborowski for sampling representative trees in a forest stand.⁴⁶ In this way, the tree selection can be considered as a representative sample of the surrounding forest. This methodology has been verified in different studies related to the characteristics of trees and the physical properties of wood.⁴⁷⁻⁵³ Figure 1 shows the spatial distribution of the trees in the plot.

2.3.4 Statistical analysis

The Spearman correlation coefficient was used to link the voltage and intensity data with the meteorological variables. The use of Spearman correlation was based on other works^{54,55} affirming that this coefficient is less sensitive than other statistics to outliers.

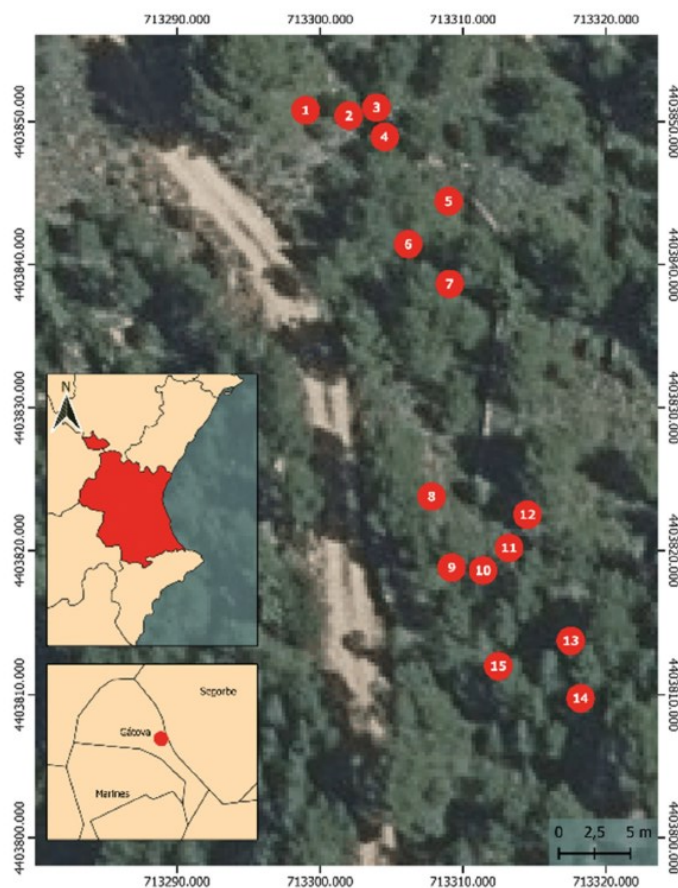


Figure 1. Distribution of the selected trees in the research plot.

Table 1. Short-term experiment calendar.

Campaign ID	Dates	Days	Season	Measurement
1	26 th April to 1 st May, 2019	6	Spring	Voltage
2	29 th June to 3 rd July, 2019	5	Summer	Voltage
3	15 th June to 20 th June, 2020	6	Spring	V + ISC
4	6 th March to 12 th March, 2021	6	Winter	V + ISC

2.4 Measures for short-term evolution

This experiment monitors the influence of the day-night cycles on the electrical signal in a single tree as described in.^{19,42,56,57} Voltage and current measurements were prolonged for several days in a row, and the recording sessions took place in different seasons to observe electrical variations throughout the year.

2.4.1 Procedure

The electrical potential difference was registered every second, while the intensity was measured during ten seconds every two minutes to allow the electrical signal to recover. Table 1 shows the dates on which the 24-hour measurement sessions were carried out.

The experiments carried out during 2019 only included voltage measures, while intensity and voltage were both measured from 2020 onwards (see Table 1).

2.4.2 Measurement equipment and external data sources

Figure 2 shows the position of the equipment for data measurement on the selected tree. In this figure you can also see the installation in height on the trunk to protect the action of the fauna the watertight capsule that, in turn, protects the electronic components of measurement from meteorological factors.

For the short-term data-acquisition campaign, a prototype was developed that uses a Mooshim Mooshimeter BLE-DMM -2X-01 device with an accuracy of 0.5% for any voltage measurement. The intensity magnitude was gathered by measuring the voltage drop across a shunt.

The intensity of the electrical signal dropped to values close to zero if the measurement device was maintained connected through the shunt, as our prior experience indicates (see Figure 3). To avoid the plant stress emerging from the shunt experiment, the prototype had a relay controlled with an automatic programmable system (Pycom¹). In this way, the circuit could periodically be interrupted, making current measurements through the shunt punctually and not continuously.

Sunrise and sunset hours were consulted in the Spanish National Astronomical Observatory.⁵⁸

2.4.3 Tree selection

For the 24-hour monitoring, it was necessary to work on a single tree due to equipment availability limitations. The selected tree (number 11) for the continuous evaluation displayed a yearly average voltage that was the closest to the group's mean among all specimens of the long-term data collection.

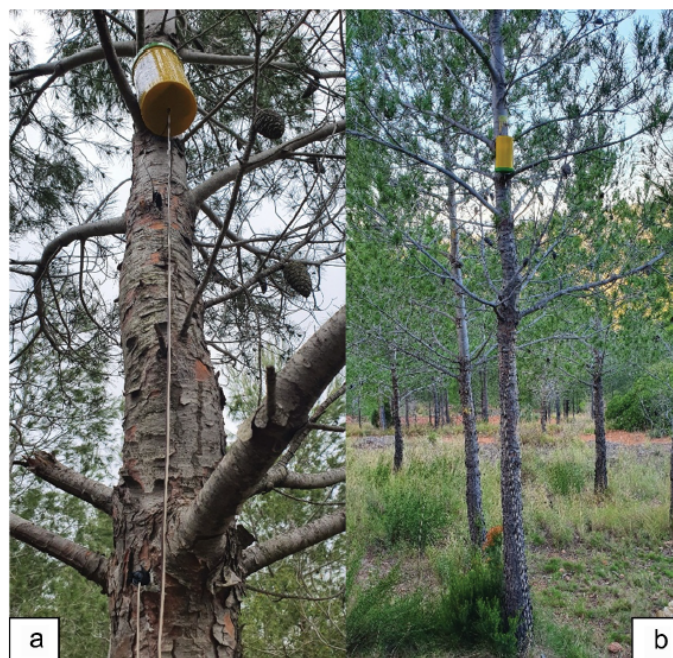


Figure 2. Short-term data-acquisition emplacement in a selected tree. Close vision of the watertight capsule (a). Overview of the installation (b).

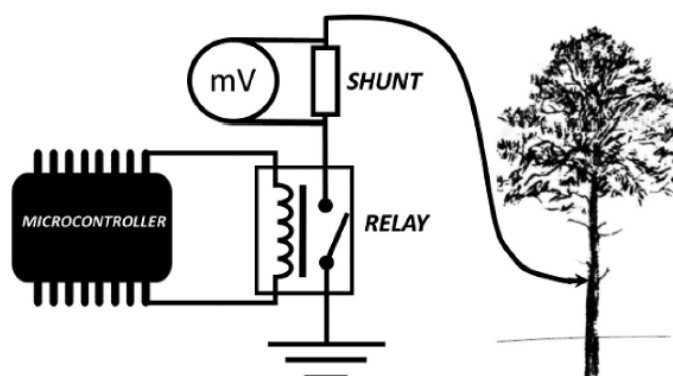


Figure 3. Circuit diagram of measurement through the shunt.

3 Results

3.1 Long-term evolution

The first obtained results are the voltage and intensity signals for the long-term experiment. Figure 4 shows the mean, maximum and minimum values for the population sampled during the 16-month campaign. The maximum recorded value is 1.10 V for the voltage (Figure 4(a)) and 11.05 μA for the current (Figure 4(b)), while the minimum magnitudes correspond to 0.11 V and 0.00 μA , respectively. It can be observed that the voltage values are maintained within a narrower range with respect to the electrical current. This means that there are smaller variations among the specimens for the voltage than for the current. The highest values were measured in October and November 2018 and April and May 2019, corresponding to autumn and spring seasons. Conversely, the minimum values were recorded in February, March 2018, July and August of both years. So, during winter and summer, minimal values are registered, especially for the summer months. The vertical dashed lines represent the dates on which the tree pictures were taken (Figure 4(c)). One photo was taken at the end of July, which corresponds to the period with the highest hydric stress for the tree. The second picture corresponds to the end of April, which is the beginning of the growth period, that is, when temperatures are not too high, and there is enough water availability due to intense rainfalls in the spring.

Figure 5 shows the mean voltage and intensity values of all trees along with the long-term experiment. Here, we can observe that there is a characteristic relationship between both magnitudes. Remarkably, voltages below 0.6 V do not allow any measurable ISC values. These records are only gathered during summer seasons and in the coldest months of the year. Alternatively, high voltage and ISC figures are gathered during both rainy seasons under moderate temperatures. The relationship between both electrical components follows an exponential behavior. In fact, voltage increases above 1.0 V promote considerable ISC rises, which represents a consistently recurring phenomenon throughout the study period.

3.2 Relationship between the electrical signal and the atmospheric variables

Figure 6 shows the main results obtained from Spearman's correlation analysis. Based on its outcome, it can be stated that there is a strong positive correlation between the voltage and the ISC values, as previously described. This correlation reaches a Spearman r -value of 0.838 with $p < .05$. Nevertheless, there is no correlation between the voltage, nor the ISC, and the atmospheric pressure. In relation to the wind speed and the relative humidity, there is neither a significant correlation of these variables with the voltage variable since the calculated p -values are 0.372 and 0.082, respectively. Analogously, the effect of the wind on the ISC (negative effect) is statistically significant. However, this is not the case for the ISC and the air humidity. Moreover, the relationship with the daily temperature was shown to be significant only with respect to the voltage, being such an influence negative with $r = -0.402$. In contrast, there was no correlation with statistical significance for the ISC magnitude, being the associated $p = .083$.

The precipitation amount is the atmospheric variable showing the highest correlation according to the Spearman methodology. There is a statistically significant correlation for both, the voltage and the ISC, with a $p < .05$ and reaching a value of 0.652 for the voltage and 0.709 for the ISC. Since rainfall is the most influential variable on the tree's electrical signals, we will now plot the weekly accumulated precipitation on the voltage and ISC evolution as depicted in Figure 7. It can be observed that while the voltage seems to be less dependent on the precipitation, this is not the case for the ISC values. Thus, this magnitude is correlated with the rain intensity. Indeed, ISC increases are measured when it had rained the week before. To some extent, the intensity rise seems to be proportional to the rainfall amount for summer and autumn, whereas there is no recorded rain in winter during our experiment period. However, the trees in spring seem to strongly react to the rain regardless of its intensity.

Figure 8 shows the evolution of the temperature and the voltage. It can be seen that there is a negative correlation between those magnitudes from July to October, whose

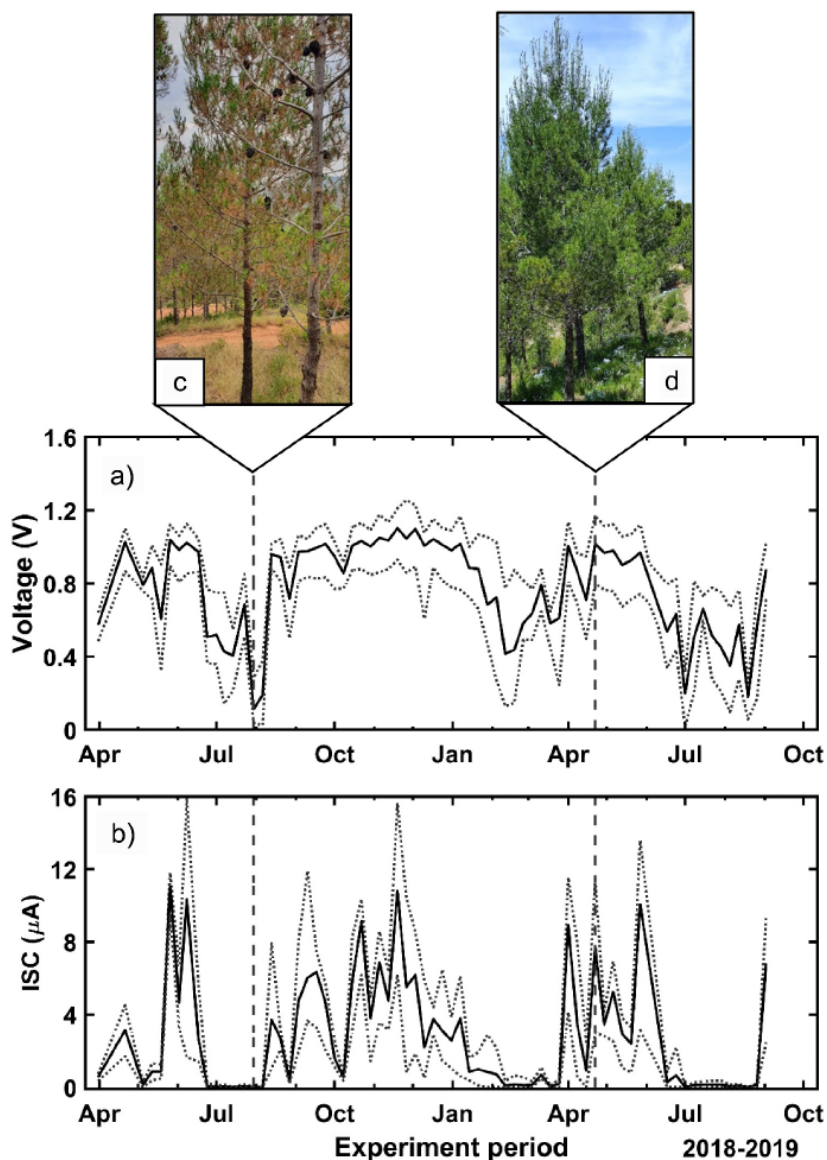


Figure 4. Temporal evolution of the voltage (a) and the ISC (b) during the long-term experiment given as the principal value of all trees. Maximum and minimum values are also depicted (dotted). Dashed vertical lines represent the dates when the tree pictures (C/D) were measured.

valueshow is -0.687 , and a positive one who accounts for 0.262 during the first semester of the year.

3.3 Short-term evolution

Four 24-hour experiments were carried out during several days at different seasons to observe the trees' electrical response to the day-night cycles. The graph for each voltage experiment is displayed in Figure 9. Similarly, the concurrent ISC trials (only two experiments in this case) are shown in Figure 10.

The first trial was performed from 26th April to 01st May 2019. That is, during the most important growing period of the trees due to their vegetative activity [67]. The maximum temperature was 20.6°C and the experiment was carried out three days after the last precipitation (2.6 mm) and seven days since the last storm occurred (139.4 mm). Figure 9(a) shows the daily voltage variations, which account for 0.05 V. Moreover, the highest potential difference is gathered at night. Indeed, the largest difference is obtained at the local sunrise time. The electrical signal decrease gradually until reach a minimum voltage difference at the zenith. From this

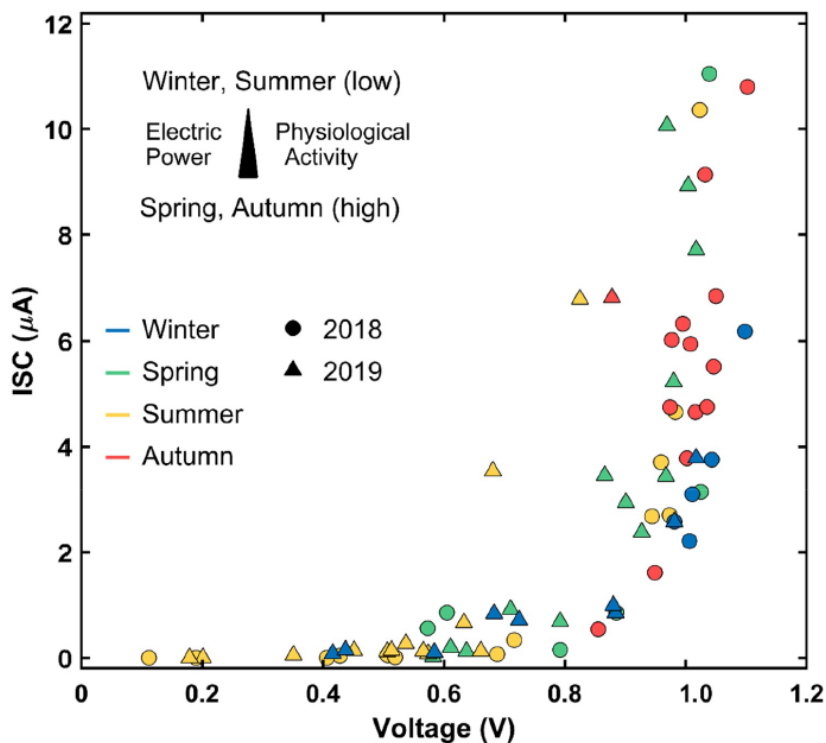


Figure 5. Relationship between the mean voltage and ISC of all trees for the long-term campaign.

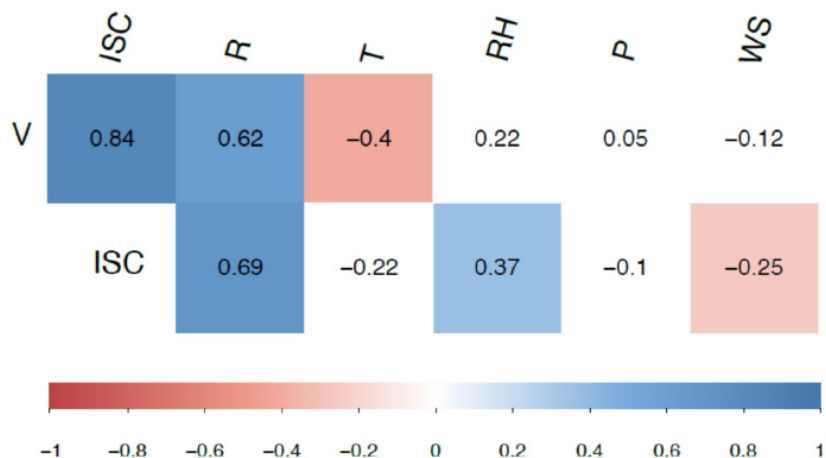


Figure 6. Result of Spearman's correlation. Values within a colored box correspond to a statistically significant correlation different from 0 with the alpha significance level equal to 0.05.

moment on, the registered potential difference begins to increase until the sunset.

The next test was carried out from 29th June to 4th July 2019 (Figure 9(b)). The trees in this period are in one of the most stressful phases of the year due to the high temperatures and scarce water availability. Measurements were taken 37 days after the last recorded storm, with a maximum temperature

measured by the meteorological station of 36.9°C. Under these conditions of water stress, the signals continue to show daily oscillations of 0.05 V and an inversion of the periods of maximum and minimum voltage compared to the spring period. There is a steep voltage reduction for the period between 9:30 p.m. and 10:00 a.m. of the next day. Later, there is a relatively moderate voltage increase between 10:00 a.m. and 2:00 p.m.

e1948744-8 R. ZAPATA ET AL.

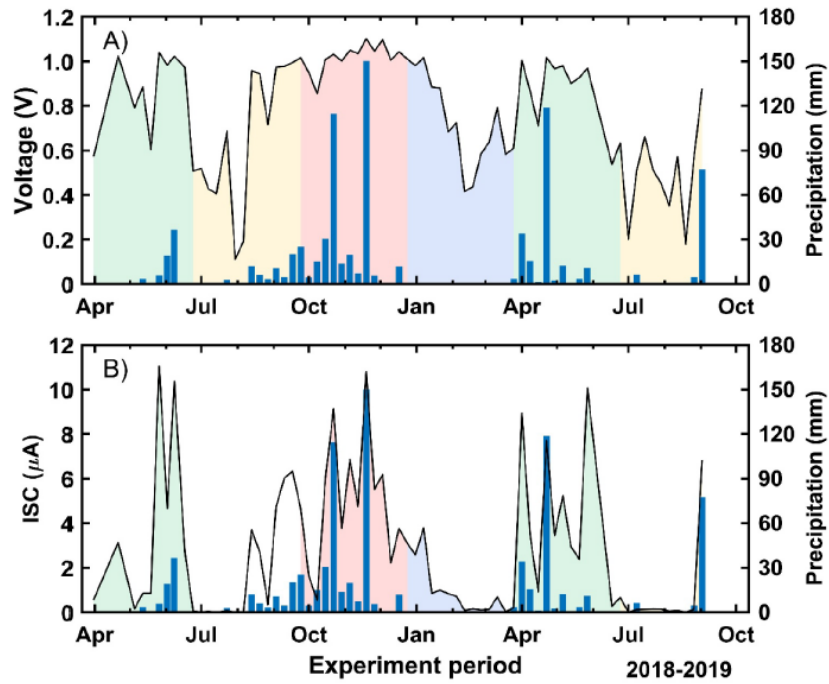


Figure 7. Temporal evolution of the voltage (a) and the ISC (b) during the long-term experiment given as the mean value of all trees. The rainfall amount is also displayed. Background colors represent the corresponding astronomical season.

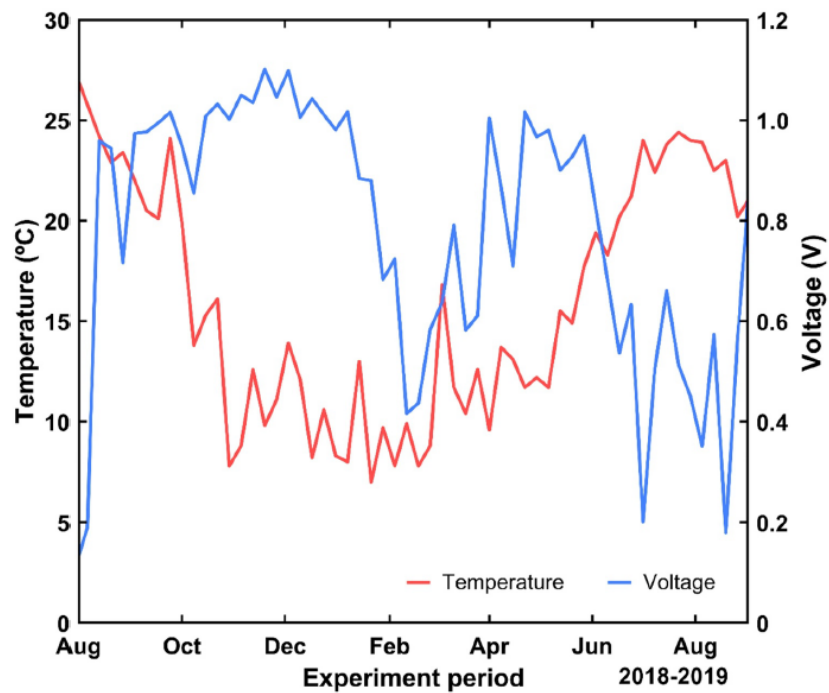


Figure 8. Temporal evolution of the temperature and the mean voltage of all trees during the long-term experiment.

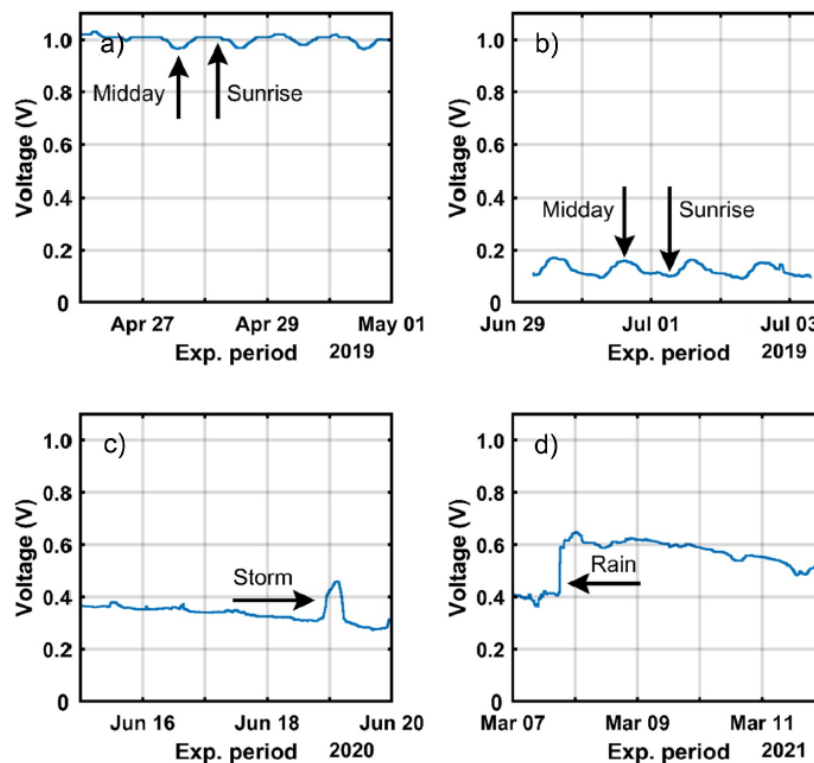


Figure 9. Voltage evolution for different short-term experiments. Events related with voltage changes are indicated with arrows. A) from 26th April to 1st May 2019. B) from 29th June to 4th July 2019. C) from 15th to 20th June 2020. D) from 6th to 12th March 2021.

Then, a stability period is reached until approximately 8:30 p.m. to end up with a marked decrease until approximately 9:30 p.m., when the cycle begins again.

Other measurement series were made during the period between the 15th and the 20th of June 2020 (Figure 9(c)). With an elapsed period of five days since the last period of rainfall, when 10.6 mm were collected in three days of rain. In this period, the weather station recorded a maximum temperatures of 26.6°C. The graph shows no apparent variations between night and day hours. On June 19th, we observe a marked electrical anomaly of more than 1 V that coincides in date and time with an electrical storm with hardly any measurable rain (0.6 mm) over the tree area. The sudden increase of voltage disappeared few hours after the storm had vanished. Figure 9(c) also outlines a clear downward trend in the voltage values along the studied period.

Furthermore, between the 6th and the 12th of March 2021, the maximum recorded temperature was 22.1°C, while the minimum accounted for 2°C. During this measurement period, an overall rainfall of 21.4 mm was recorded on the 7th and the 8th of March, in this case without any atmospheric electrical activity. This rain event coincides with a sudden increase in the registered electric signal amplitude as shown in Figure 9(d). Unlike the transitory voltage behavior displayed in Figure 9(c), the electrical signal does not return to the previous level it held

before the precipitation occurred (0.4 V). On the contrary, after the rain episode, a voltage magnitude of 0.6 V is maintained for almost two days. Then, it slowly decreases up to values close to 0.5 V.

During the last two voltage experiments, ISC measurements were also gathered. The related results are displayed in Figure 10. The experiment carried out in June 2020 (Figure 10(a)) shows the trend of the ISC along the studied period. It can be seen that its evolution resembles the voltage progress, including the electric anomaly derived from the storm. Unlike the voltage trend, the ISC shows clear maximum and minimum values, corresponding to midday and some hours after midnight, respectively. In this case, a voltage level of 0.4 V is enough to sustain some current. However, its magnitude is close to zero. Similarly, the ISC measurements gathered during the second week of March 2021 (Figure 10(b)) display the same voltage trend of that week: after the rain event, the ISC and the voltage remain much higher than before the rainfall. In particular, the initial current level of 0.4 μ A is multiplied by a factor of 10 after the rain and slowly decrease at a rate of 1 μ A each two days approximately. In this case, no clear local extrema are distinguishable during this week. This means that the surplus of electricity derived from the intense rain masks the daily electrical oscillations.

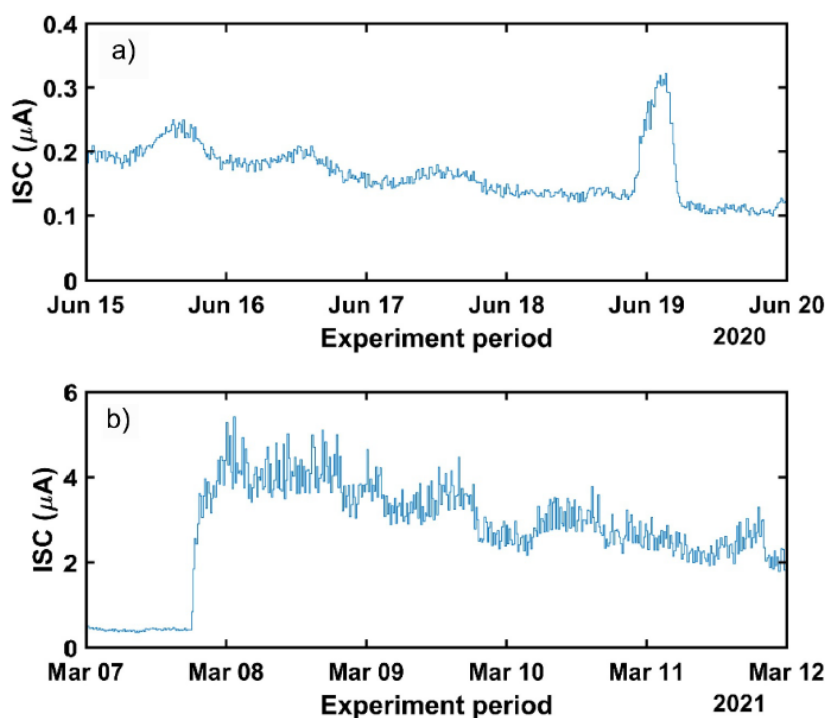


Figure 10. ISC evolution during two different short-term experiments. ISC evolution (a) and (b) correspond to the experiment shown in (c) and (d) of Figure 9, respectively.

4 Discussion

4.1 Long-term evolution

The long-term evolution of the voltage and the ISC in the trees is strongly affected by the seasonal characteristics of the Mediterranean climate: low and occasionally zero electrical signals are collected during dry periods, that is, in winter and especially in the middle of summer as shown in Figure 4. In this sense, the hydric stress suffered by the trees during these periods leads to yellow coloration and a lower needle density.⁵⁹ This contrasts sharply with the intense green color and the higher needle density displayed by the pines in autumn and spring, as shown in Figure 4(c) and 4(d) when both electrical components are at their maximum values. Prior literature also reports seasonal variations of the voltage in trees under controlled conditions over long periods.^{12,19,56} However, extreme values might be obtained in different periods according to the climatic characteristics of each location and consequently to the adaptation of each tree species to the environmental conditions of its habitat.

In this research, voltages below 0.6 V do not support any measurable ISC values. These records are normally gathered during the summer season and in the coldest months of the year. Thus, we expect the tree to stay in a dormant state when such magnitudes are measured. In addition, the rainfall seems to be strongly correlated with the ISC magnitude throughout the year, with the only exception of the spring months. During this period, sustained ISC values are measured regardless of the precipitations. Certainly, it is known that

Pinus halepensis presents marked seasonally growth periods⁶⁰ due to the climatic pattern along the year, concentrating its main physiological activity in spring when water availability is high and temperatures are in the optimal range. Alternatively, *Pinus halepensis* stops growing during the summer and winter. Moreover, it is known that the lack of water leads to the interruption of plant growth in many species, including this Mediterranean pine.⁵⁹ We similarly demonstrate that the electrical signal, especially the intensity, shows a reduction in the periods when the water availability is scarce. Hence, we expect the ISC magnitude to be a good indicator of the physiological state of the tree and that values below the given voltage threshold correspond to null net photosynthetic activity. Moreover, Gil et al.¹⁴ found that the voltage values gathered in avocado trees under controlled conditions were dependent on changes in the soil water content.

In addition, some authors have identified a seasonally differentiated effect of the temperature on the radial growth of *Pinus halepensis*.⁶⁰ They reported a negative relationship in the months of July to October and a positive one during the first semester of the year. We have also detected such a bimodal trend in our results: during the first half of the year, there is a positive correlation between the temperature and the voltage, while it is negative in the second half. Hence, considering the growth-temperature dependence described in,⁶⁰ it might be possible to establish a correlation between the pine growth and the voltage.

Another outcome of this research is the analysis of the electrical signal of individual trees. The individual

measurements confirm that all trees experience similar trends regarding their electrical output. However, there is some signal variability, especially in the intensity magnitude (Figure 4(b)) and to a lesser extent in the voltage (Figure 4(a)), despite being all specimens coeval and located in a plot with similar soil characteristics. Similarly, minor differences could also be appreciated among the trees regarding their external aspects and the harsh periods regarding extreme climatic conditions. The dissimilarities among the specimens could be a consequence of the micro-geology around each tree. Indeed, minor local differences in the soil and subsoil properties can also affect the tree response.⁶¹ Furthermore, other authors mention that the influence of microsites⁶² and the morphological attributes of each tree⁶³ can confer unique characteristics to each specimen and thus, a partially different electrical response might emerge in each tree.

4.2 Short-term evolution

The appearance of daily cyclical variations of the electrical response coincides with the experiences reported by other authors.^{42,56} Figure 9(a) displays voltage oscillations, whose mean value is close to 1 V. The signal range, i.e., the maximum and minimum value difference is around 30 mV. This figure is very close to that published by Koppán,⁵⁶ who measured daily voltage variations in *Quercus cerris* during the same week of the year and also reported maximum values at night and minimal during midday. Alternatively, daily variations during summer display an inversion (Figure 9(b)) with respect to the time of local extreme appearance in spring (Figure 9(a)): minimal voltage values are gathered at night and the highest measurements are obtained during the day in the hot period.

During two of our short-term trials, two electrical anomalies originated by an electrical storm and a punctual rain were registered. In the first case, a sudden and transient increase in the voltage and the ISC was detected (Figure 9(c) and Figure 10(a)). On the contrary, in the second case a signal enlargement was recorded that lasted longer than the atmospheric instability (Figure 9(d) and Figure 10(b)), probably due to a higher water availability in the soil. Hence, atmospheric events can also alter both electrical magnitudes and have to be taken into account when analyzing short-term characteristics of the electrical signals in Mediterranean pines. Moreover, the ISC measurements describe the same behavior as in the voltage case after the appearance of the mentioned electrical phenomena, as displayed in Figure 10(a) and Figure 10(b). Similar electrical alterations were observed in,⁵⁶ since the voltage maxima in *Fagus sylvatica* are enhanced when atmospheric electricity is present. Moreover, precipitation was found to impact the electrical outcome for several days as it occurs in our research.

Additionally, some authors have observed the reversal of the current flow in the trees due to the presence of positively charged atmospheric islands.⁵⁷ Nevertheless, we could not recognize such a phenomenon in our measurements.

In summary, we have identified the existence of seasonal and daily patterns of both electrical-signal components of *Pinus halepensis* in natural ecosystems. In addition, we have also found a clear correlation between the fallen precipitation

on the area and the variations in the electrical signal of the trees, especially with respect to the electrical intensity. Remarkably, we found a minimum voltage of 0.6 V that is necessary to measure intensity flows in our circuit. Since lower voltage values are only measured during the most demanding periods of the year, that is, when the pines have a very low photosynthetic activity, we think that the ISC could be a good estimator of the physiological activity. Moreover, soil humidity is the most limiting factor for pine growth in the Mediterranean ecosystem and periods without rain are clearly correlated with low voltages and zero ISC measurements. So, the measured electrical components seem to be potential estimators of the tree health and activity, e.g. monitoring moisture content and consequently, bushfire or pest risk.

Further work is necessary to predict the contribution of each atmospheric and environmental factor to the electrical signal. Indeed, a complete understanding of the electrophysiological behavior of *Pinus halepensis* is critical for future applications such as bushfire risk or pest monitoring and detection. Hence, the electrical signals generated by the trees could be used as indicators of the tree physiological state and thus, leveraged for in situ and permanent monitoring of Mediterranean forests in the actual scenario of climate change.

Note

1. <https://pycom.io/>








Geolocation information

Datum: ETRS89N
 Latitude: 39° 45' 28.80" N
 Longitude: 0° 30' 36.36" W
 UTM zone: 30
 Coord. X: 713.297,97
 Coord. Y: 4.403.863,10

Disclosure statement

No potential conflict of interest was reported by the author(s).

ORCID

Rodolfo Zapata  <http://orcid.org/0000-0002-3601-9681>
 Jose-Vicente Oliver-Villanueva  <http://orcid.org/0000-0003-2842-7834>
 Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga  <http://orcid.org/0000-0002-6361-6019>
 David Fuente  <http://orcid.org/0000-0003-4141-7948>
 Miguel A. Mateo Pla  <http://orcid.org/0000-0002-8059-6996>
 Jorge E. Luzuriaga  <http://orcid.org/0000-0002-9040-5954>
 Juan Carlos Moreno Esteve  <http://orcid.org/0000-0002-7696-9745>

References

1. Gimeno TE, Pías B, Lemos-Filho JP, Valladares F. Plasticity and stress tolerance override local adaptation in the responses of Mediterranean holm oak seedlings to drought and cold. *Tree Physiol.* 2009;29:87–98.
2. Pausas JG, Vallejo VR. The role of fire in European Mediterranean ecosystems. In: Chuvieco E, editor, *Remote Sensing of Large Wildfires in the European Mediterranean Basin*. Berlin: Springer; 1999. p. 3–16.

3. Syphard AD, Radeloff VC, Hawbaker TJ, Stewart SI. Conservation threats due to human-caused increases in fire frequency in Mediterranean-climate ecosystems. *Conserv Biol.* 2009;23:758–769.
4. Gracia CA, Sabaté SY, Sánchez A. 2002. El cambio climático y la reducción de la reserva de agua en el bosque mediterráneo. *Ecosistemas* 2002/2. <http://www.aet.org/ecosistemas/022/investigacion4.htm>)
5. Guillen-Climent ML, Mas H, Fernández-Landa A, Algeet-Abarquero N, Tomé JL. Using hyperspectral images for decay detection in *Pinus halepensis* (Mill.) in the Mediterranean forest. *Revista de Teledetección.* 2020;55:59–69. doi:10.4995/raet.2020.13289.
6. De Dios VR, Fischer C, Colinas C. Climate change effects on Mediterranean forests and preventive measures. *New For.* 2007;33:29–40.
7. Hódar JA, Zamora R, Cayuela L. Climate change and the incidence of a forest pest in Mediterranean ecosystems: can the North Atlantic Oscillation be used as a predictor? *Clim Change.* 2012;113:699–711.
8. Love CJ, Zhang S, Mershin A. Source of sustained voltage difference between the xylem of a potted *Ficus benjamina* tree and its soil. *PLoS One.* 2008;3:8.
9. Oyarce P, Gurovich L. Electrical signals in avocado trees. *Plant Signal Behav.* 2010;5(1):34–41. doi:10.4161/psb.5.1.10157.
10. Datta P, Palit P. Relationship between environmental factors and diurnal variation of bioelectric potentials of an intact jute plant. *Curr Sci.* 2004;87:680–683.
11. Gora EM, Yanoviak SP. Electrical properties of temperate forest trees: a review and quantitative comparison with vines. *Can J For Res.* 2015;45(3):236–245. doi:10.1139/cjfr-2014-0380.
12. Gibert D, Le Mouel JL, Lams L, Nicollin F, Perrier F. Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk. *Plant Sci.* 2006;171(5):572–584. doi:10.1016/j.plantsci.2006.06.012.
13. Gil PM, Gurovich L, Schaffer B. The electrical response of fruit trees to soil water availability and diurnal light-dark cycles. *Plant Signal Behav.* 2008;3(11):1026–1029. doi:10.4161/psb.6786.
14. Gil PM, Gurovich L, Schaffer B, Garcia N, Iturriaga R. Electrical signaling, stomatal conductance, ABA and ethylene content in avocado trees in response to root hypoxia. *Plant Signal Behav.* 2009;4(2):100–108. doi:10.4161/psb.4.2.7872.
15. Rios-Rojas L, Morales-Moraga D, Alcalde JA, Gurovich LA. Use of plant woody species electrical potential for irrigation scheduling. *Plant Signal Behav.* 2015;10(2):e976487. doi:10.4161/15592324.2014.976487.
16. Volkov AG, Ranatunga DRA. Plants as environmental biosensors. *Plant Signal Behav.* 2006;1:105–115.
17. Morat P, Le Mouel JL, Granier A. Electrical potential on a tree. A measurement of the sap flow? *Comptes rendus de l'Académie des sciences Serie 3, Sciences de la Vie.* 1994; 317: 98–101.
18. Gindl W, Loppert HG, Wimmer R. Relationship between streaming potential and sap velocity in *Salix Alba* L. *PHYTON-HORN.* 1999;39:217–224.
19. Koppan A, Szarka L, Wesztergom V. Temporal variation of electrical signal recorded in a standing tree. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica.* 1999;34:169–180.
20. Koppan A (2004). Variations of the natural electric potential differences occurring on tree trunks and their relationship with the xylem sap flow. PhD Thesis. University of West Hungary. Sopron, Hungary.
21. Lamb HH, Gray BM. Tree rings and climate. By H. C. Fritts. London, New York and San Francisco, Academic Press, 1976. *Q J R Meteorol Soc.* 1978;104:236–237. doi:10.1002/qj.49710443923.
22. Olivar J, Bogino S, Spiecker H (2009, June). Influencia del clima en el crecimiento radial de *Pinus halepensis* de diferentes clases sociales e identificación de las variables climáticas más importantes. *Congresos Forestales.*
23. Maestre FT, Cortina J, Bautista S, Bellot J. Does *Pinus halepensis* facilitate the establishment of shrubs in Mediterranean semi-arid afforestations? *For Ecol Manage.* 2003;176:147–160.
24. Chomel M, Fernandez C, Bousquet-Mélou A, Gers C, Monnier Y, Santonja M, ... Baldy V. Secondary metabolites of *Pinus halepensis* alter decomposer organisms and litter decomposition during afforestation of abandoned agricultural zones. *J Ecol.* 2014;102:411–424.
25. Rathgeber CB, Cuny HE, Fonti P. Biological basis of tree-ring formation: a crash course. *Front Plant Sci.* 2016;7:734.
26. Castagneri D, Fonti P, von Arx G, Carrer M. How does climate influence xylem morphogenesis over the growing season? Insights from long-term intra-ring anatomy in *Picea abies*. *Ann Bot.* 2017;119:1011–1020.
27. Ekberg I, Eriksson G, Dormling I. Photoperiodic reactions in conifer species. *Ecography.* 1979;2:255–263.
28. Mattsson A. Seasonal variation in root growth capacity during cultivation of container grown *Pinus sylvestris* seedlings. *Scand J For Res.* 1986;1:473–482.
29. Rodríguez-Calcerrada J, Salomón R, Gil L. Transporte y reciclaje de CO₂ en el interior del árbol: factores que complican la estimación de la respiración leñosa a través de la emisión radial de CO₂. *Bosque (Valdivia).* 2015;36:5–14.
30. Pfanz H, Aschan G, Langenfeld-Heyser R, Wittmann C, Loose M. Ecology and ecophysiology of tree stems: cortical and wood photosynthesis. *Naturwissenschaften.* 2002;89:147–162.
31. Zapata R, Oliver-Villanueva JV, Lemus-Zúñiga LG, Luzuriaga JE, Mateo Pla MA, Urchueguía JF. Evaluation of electrical signals in pine trees in a mediterranean forest ecosystem. *Plant Signal Behav.* 2020;15(10). doi:10.1080/15592324.2020.1795580.
32. The Editors of Encyclopædia Britannica. Electric power. *Encyclopædia Britannica.* Encyclopædia Britannica, inc. Accessed August 31, 2020. <https://www.britannica.com/technology/electric-power>
33. De Luis M, Čufar K, Di Filippo A, Novak K, Papadopoulos A, Piovesan G, Smith KT. Plasticity in dendroclimatic response across the distribution range of Aleppo pine (*Pinus halepensis*). *PLoS One.* 2013;8:12. doi:10.1371/journal.pone.0083550.
34. AAVV. (2008). Distribution map of aleppo pine. EUFORGEN 2009, [Accessed 2020 July 16]. www.euforgen.org
35. Fadi B, Semerci H, Vendramin GG 2003. EUROFORGEN technical guidelines for genetic conservation and use for aleppo pine (*Pinus halepensis*) and brutia pine (*Pinus brutia*). IPGRI, International plant genetic resources institute. Rome (Italy). 6. ISBN 92-9043-571-2.
36. Mauri A, Di Leo M, de Rigo D, Caudullo G. *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: San-Miguel-Ayanz J, de Rigo D, Caudullo G, Houston Durrant T, Mauri A, editors. *European Atlas of Forest Tree Species.* Luxembourg:Publ. Off. EU; 2016. p. e0166b8+.
37. Pausas JG, Ribeiro E, Vallejo R. Post-fire regeneration variability of *Pinus halepensis* in the eastern Iberian Peninsula. *For Ecol Manage.* 2004;203(1–3):251–259. doi:10.1016/j.foreco.2004.07.061.
38. IFN3. Tercer inventario forestal nacional (3rd national forest inventory of Spain). Ministerio para la Transformación Ecológica y el Reto Demográfico; Spain, 2007. [Retrieved 2002 July 16] <https://www.miteco.gob.es/biodiversidad/servicios/banco-datosnaturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>
39. Valbuena P, Bravo F. Stand density Management diagrams for two mediterranean pine species in Eastern Spain. *For Syst.* 2008;17:97–104.
40. Richter K, Eckstein D, Holmes RL (1991). The dendrochronological signal of pine trees (*Pinus* spp.) in Spain.
41. Bogino SM, Bravo F. Growth response of *Pinus pinaster* Ait. to climatic variables in central Spanish forests. *Ann For Sci.* 2008;65:506.
42. Cardoso SS, Carrondo LB, Marques JM, Narciso PN, Rocha MJ, Rodrigues IN, Soares A (2004). Monitorization of the electrical

- signal generated by a tree. February 2004 – 4th luso-spanish assembly on geodesy and geophysics.
43. Hao Z, Li W, Hao X. Variations of electric potential in the xylem of tree trunks associated with water content rhythms. *J Exp Bot.* 2021;72:1321–1335.
 44. Directive 1999/5/EC Of The European Parliament and of the council of 9 march 1999.
 45. Asociación Valenciana de Meteorología 'Josep Peinado' (AVAMET). Accessed December 15, 2020. <https://www.avamet.org/mx-mxo.php?id=c11m902e01>
 46. Hapla F, Saborowski J. Planning of sample size for wood anatomical investigations. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 1987;45:141–144.
 47. Oliver-Villanueva JV, Becker G. Verwendungsrelevante Holzeigenschaften der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und ihre Variabilität im Hinblick auf Alter und Standraum. *Forst und Holz.* 1993;48:387–391.
 48. Hapla F, Oliver-Villanueva JV, Gonzalez-Molina JM. Effect of silvicultural management on wood quality and timber utilisation of *Cedrus atlantica* in the European Mediterranean area. *Holz als Roh-und Werkstoff.* 2000;58(1–2):1–8. doi:10.1007/s001070050377.
 49. Seeling U, Sachsse H (1991). *Abnorme Kernbildung bei Rotbuche und ihr Einfluß auf holzbiologische und holztechnologische Kenngrößen [Abnormal heartwood formation in beech and its influence on the biological and technological features of the wood]* (Doctoral dissertation, Doctoral thesis, 2nd).
 50. Sauter U *Technologische Holzeigenschaften der Douglasie (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco) als Ausprägung unterschiedlicher Wachstumsbedingungen.* Freiburg i. Breisgau, Germany, 1992.
 51. Dix B, Roffael E, Becker G, Gruss K. Properties of pulps prepared from poplar wood of different clones, sites and ages. *Papier.* 1992;46:583–592.
 52. Wobst J (1995). *Auswirkungen von Standortwahl und Durchforstungsstrategie auf verwertungsrelevante Holzeigenschaften der Douglasie (Pseudotsuga menziesii (Mirb.) Franco)* (Doctoral dissertation). University of Göttingen.
 53. Peters S (1996). *Untersuchungen über die Holzeigenschaften der Stieleiche (Quercus robur L.) und ihre Beeinflussung durch die Bestandesdichte.* Papierflieger, UNIVERSITY OF GÖTTINGEN.
 54. Restrepo LF, González J. From pearson to Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias.* 2007;20:183–192.
 55. Faraway JJ. Extending the linear model with R: generalized linear, mixed effects and nonparametric regression models. Boca Raton, FL: CRC press; 2016. ISBN-13: 978-0-203-49228-4.
 56. Koppán A, Szarka L, Wesztergom V. Annual fluctuation in amplitudes of daily variations of electrical signals measured in the trunk of a standing tree. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences-Series III-Sciences de La Vie* 323.6 (2000): 559–563.
 57. Le Mouél JL, Gibert D, Poirier JP. On transient electric potential variations in a standing tree and atmospheric electricity. *C R Geosci.* 2010;342:95–99.
 58. Observatorio Astronómico Nacional, Instituto Geográfico Nacional, Ministerio de Fomento, España. Accessed December 15, 2020. <https://astronomia.ign.es/web/guest/hora-salidas-y-puestas-de-sol>
 59. Belda-Palazón B, Adamo M, Valerio C, Ferreira LJ, Confraria A, Reis-Barata D, Rodrigues A, Meyer C, Rodriguez PL, Baena-González E. A dual function of SnRK2 kinases in the regulation of SnRK1 and plant growth. *Nat Plants.* 2020Nov;6(11):1345-1353. doi: 10.1038/s41477-020-00778-w.1–9.
 60. Matamoros MR, Merino EG, Ibáñez NI, Bernal EM. Sensibilidad y grado de adaptación de "Pinus halepensis" mill. a la variabilidad climática en la provincia de Zaragoza. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales.* ISSN 1575-2410, N.º. 26, 2008. p. 137–142.
 61. Carriere SD, Ruffault J, Pimont F, Doussan C, Simioni G, Chalikakis K, ... Davi H. Impact of local soil and subsoil conditions on inter-individual variations in tree responses to drought: insights from electrical resistivity tomography. *Sci Total Environ.* 2020;698:134247.
 62. Cailleret M, Nourtier M, Amm A, Durand-Gillmann M, Davi H. Drought-induced decline and mortality of silver fir differ among three sites in Southern France. *Ann For Sci.* 2014;71:643–657.
 63. Cailleret M, Jansen S, Robert EM, Desoto L, Aakala T, Antos JA, ... Čada V. A synthesis of radial growth patterns preceding tree mortality. *Glob Chang Biol.* 2017;23:1675–1690.

13. ANEXO III



Article

Electrical Responses of *Pinus halepensis* Mill. as an Indicator of Wildfire Risk in Mediterranean Forests by Complementing Live Fuel Moisture

Rodolfo Zapata *, Jose-Vicente Oliver-Villanueva , Lenin-Guillermo Lemus-Zúñiga , Miguel A. Mateo Pla and Jorge E. Luzuriaga

ITACA Research Institute, Universitat Politècnica de València, 46022 València, Spain; joolvil@upv.es (J.-V.O.-V.); lemus@upvnet.upv.es (L.-G.L.-Z.); mimateo@upv.es (M.A.M.P.); jorluqui@upvnet.upv.es (J.E.L.)

* Correspondence: rozaza@upv.edu.es



Citation: Zapata, R.; Oliver-Villanueva, J.-V.; Lemus-Zúñiga, L.-G.; Mateo Pla, M.A.; Luzuriaga, J.E. Electrical Responses of *Pinus halepensis* Mill. as an Indicator of Wildfire Risk in Mediterranean Forests by Complementing Live Fuel Moisture. *Forests* **2022**, *13*, 1189. <https://doi.org/10.3390/f13081189>

Academic Editor:
Palaiologos Palaiologou

Received: 13 June 2022

Accepted: 19 July 2022

Published: 27 July 2022

Publisher's Note: MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2022 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

Abstract: *Pinus halepensis* forests, as Mediterranean-type ecosystems, are subject to high levels of wildfire risk in times of drought, with meteorological conditions of water stress and very high temperatures, mainly in summer. Considering the difficulty of knowing the phenological state of this species, the objective of this research was to evaluate the possibility of implementing the electrical responses (voltage and short-circuit current) as a variable in fire risk management models, compared to live fuel moisture. On the one hand, the obtained results demonstrate non-significant differences between the moisture content of the different fractions of the living branches (base and half of the branch and live fuel), even in times of drought with hydric stress and very high temperatures. Live fuel moisture of *Pinus halepensis* does not show significant seasonal variations under the influence of extreme fire risk factors. For this reason, it should be complemented with other variables for fire risk management models. On the other hand, the differences registered in the electrical signal show oscillations with significant variations, which are strongly correlated with the periods of extremely favourable meteorological conditions for wildfires. So, the voltages measured show ranges that correspond with great accuracy to the FWI. Voltage variation is dependent on the hydraulic dynamic plant behaviour and a result of the physiological response of pine trees to abiotic stress of drought. It is an easy-to-measure electrical parameter as well as a very reliable indicator with a high correlation with wildfire risk. Thus, electrical responses could add more knowledge about the phenological state of the trees in dependence on stress climatic conditions, allowing integration of these variables in the preventive wildfire modelling and management.

Keywords: wildfire risk; plant electrophysiology; *Pinus halepensis*; phenological state; live fuel moisture; climatic conditions; Mediterranean forests

1. Introduction

Wildfires have been present in the Mediterranean climatic regions around the world, as a natural phenomenon long before man existed [1,2]. Wildfire is a powerful ecological and evolutionary force that regulates organismal traits, population sizes, species interactions, community composition, carbon and nutrient cycling and ecosystem functions [3,4]. Mediterranean climates are characterized by a drought season, but their length and severity can be highly variable across regions [5]. Mediterranean-type ecosystems (MTEs), with their unique climatic regime [6], support the growth of trees during the rain of spring and autumn, while the long summer drought together with the elevated temperatures produce strong biomass desiccation [7], creating highly flammable conditions [8]. Additionally, MTEs are biodiversity hotspots located between temperate mesic climates and semi-deserts and deserts, strongly affected by climate change [9].

In all these regions, wildfires present a major disturbance to natural ecosystems, resulting in significant economic and ecological losses [4,10]. Therefore, fire risk assessment

becomes a critical component of land management because it is very advantageous to anticipate the probability and magnitude of a wildfire [10]. McLauchlan et al. [4] described the diversity of ways in which fire operates as a fundamental ecological and evolutionary process and identified three emergent research challenges: the need to study fire across temporal scales, to assess the mechanisms underlying a variety of ecological feedbacks involving fire and to improve representation of fire in a range of modelling contexts. On this background, the relationship between meteorological extreme conditions and live fuel moisture is a key research topic in the complex field of fire ecology [11–21], always supported by the development of innovative technologies, especially remote sensing [22–31] and machine learning [32–34].

Forest management administrations and firefighting agencies and services are often confronted with the task of establishing proactive fire management in dependence on vulnerability and risk in different MTEs [35,36]. Many of the forecast systems are based, mainly, on meteorological data that are collected by weather stations [37], as the Canadian Forest Fire Weather Index System, which is in widespread usage globally [38]. Nevertheless, fire risk is the sum of other multiple factors [39], referring to the probability of fire ignition [37]. Globally, there is a close relationship between wildfires and anthropogenic activities, i.e., wildfires understood as human events due to negligence (e.g., agricultural burning escapes), and deliberate actions (e.g., pyromania, revenge, land use change attempts) [40], but also lightnings are more and more frequent natural causes [41], especially in large unmanaged forestlands [42].

Three major influencing factors with their respective variables intervene in the behaviour of an extreme wildfire: meteorology (wind regime, temperature, and relative humidity), topography (terrain configuration in terms of slope, accessibility, and vegetative structure) and the state of the forest fuel (moisture and flammability characteristics) [43]. All factors are closely related and jointly influence the vulnerability of forest fuel to igniting, but several authors point out the mechanisms through which plant responses to drought and, consequently, to forest flammability, specifically live fuel moisture, but also physiological reactions to water stress in the ecosystem (soil water content and plant traits, including rooting patterns and leaf traits such as the turgor loss point, osmotic potential, sap flow, elasticity and leaf mass ratio of dead to live fuels, etc.) [44,45].

In fact, the relationships between drought and wildfires are well documented for MTEs, especially in Europe [46,47], Australia [48,49] and North America [50], with wildfire occurrence and area clearly increasing in response to drought [51,52]. There is also evidence that drought interacts with other controls (wind regimes, topography, forest management activities) to affect fire intensity, severity, extent, and frequency [50,53]. Due to drought directly influences vegetation dryness in trees and shrubs [21], live fuel moisture has been identified as a key factor of significance in biomass combustibility [54–58]. In this context, it should be considered that the large plant diversity that characterizes MTEs is associated with the success of coexisting species in avoiding competition for soil resources (water and nutrients) by differential exploitation in space (soil layers) and light time (year and daily) [59]. So, live fuel moisture content is influenced by meteorological and soil variables, but mainly by the plant species and its phenological state, and hydraulic behaviour [58]. Therefore, given this influence, it is considered necessary to expand the knowledge regarding the phenological state of the different species present in the ecosystem, to know its magnitude and its seasonal variation, and to understand and predict fire behaviour [58], by testing several innovative technologies of terrestrial [60,61] and remote sensing [62].

Rothermel [63] proposed a classification of the humidity of live fuel; this classification was based on the stage of development of the vegetation. However, the data obtained in studies carried out in some MTEs differ from this classification [19,64,65], since they find a differentiated behaviour of live fuel moisture according to each species and strongly depending on seasonality [23,66]. Several authors have studied the phenological state of the vegetation by directly measuring the live fuel moisture content by taking physical

samples in the field [58,67]. Through these works, it was able to relate the phenological state of the plants with their fuel moisture content, at least in a large part of the species that inhabit the MTEs [58]. Nevertheless, for one of the most important tree species in the Mediterranean basin, such as *Pinus halepensis* [51,68–72], the results on the variation in seasonal moisture were not conclusive [58]. Since *Pinus halepensis* hardly show variation in moisture content throughout the vegetative cycle; neither show moisture variations in the face of extreme heat and drought episodes that are usually recorded in the Western European Mediterranean area [58].

Moreover, for a better understanding the phenological state of the plants in MTEs in dependence on severe drought conditions, different plant hydraulic traits have been analysed, such as the measurement of the sap flow, which was proposed for the evaluation of transpiration rates [73]. However, some authors claim that sap flow measurements only provide information on the water movement within plants and are not directly related to the rapid responses to environment or climatic stress [74]. Other authors have analysed other plant hydraulic traits, such as saturated moisture content, cell wall rigidity or turgor loss point, cell solute potential, symplastic water fraction and tissue capacitance [75].

Furthermore, some authors have been proposed the measurement of electric potential as a valid method to evaluate the phenological state and stress responses of trees and shrubs [76]. The existence of a continuous electric potential between the electrodes inserted in the tree phloem and the surrounding soil was discovered and described many years ago [77–80]. This electric potential is associated with electrochemical effects that include membrane diffusion potentials and active transport of ions [81]. In addition, more recent works documented that some environmental stimuli also produce changes in electrical signals of trees [82]. More specifically on *Pinus halepensis*, a high correlation between meteorological variables and variations in electrical signals could be demonstrated [61]. According to some authors [83–85], electrical properties (as plant physiological reaction) seem to be related to rapid responses to water stress. Unfortunately, these responses are sometimes not evident or do not produce consistent visual indicators, such as wilting and changes in leaf colour [86].

Considering these characteristics of electrical signal measured on trees, the increasing importance of *Pinus halepensis* in European Mediterranean forests [51,58,68–72], and the difficulty of knowing the phenological state of this species [58], the objective of this research was to preliminarily evaluate the possibility of implementing the electrical signals responses of *Pinus halepensis* as an indicator to complement live fuel moisture assessment, as a method to monitor the phenological state and the drought stress level. Finally, the research aims to analyse the relationship between the obtained results for electrical signals and the wildfire risk rating, normally used by firefighting agencies.

2. Materials and Methods

2.1. Research Design

This main objective of the research is to study the relationship between the electrical signals as a result of phenological state of *Pinus halepensis*, live fuel moisture content and wildfire risk. Therefore, the main parameters to be measured will be the components of the electrical signal: voltage and short-circuit current [87], together with measurements of the moisture content of the live fuel, as well as also with the main meteorological conditions (temperature, relative humidity, and rainfall) and wildfire risk index published by local meteorological or emergency agencies.

To do this, the research has been divided in two phases:

1. In a first stage, the measurements were carried out during the main wildfire season (24 weeks in the hottest and driest months, from end of spring to beginning of autumn) in a representative area of the Mediterranean basin.
2. The results of this first phase were complemented with a second survey, in which the values of the electrical signals collected in previous three years were retrospectively analysed.

2.2. Selection of Sample Stand

Pinus halepensis Mill. (Aleppo pine) and *Pinus brutia* Ten. (Turkish or Calabrian pine) are two systematically close tree species dominating MTEs in the European basin [24], which can naturally hybridize where they co-occur [88]. So, both are drought-tolerant and fast growing native coniferous species [24], well adapted to dry summer conditions [70]. *Pinus halepensis* widely covers the western side of the basin, while *Pinus brutia* is located mainly on the eastern side, both mainly at coastal zones [89]. They are among the species most affected by wildfires in Europe [90], although they are fire resilient trees due to the high production of serotinous cones that favour a quick post-fire regeneration [91]. These species have been widely planted between 1930 and 1980 in Mediterranean areas for soil protection and windbreaks near the coasts [92]. Specifically, *Pinus halepensis* is the most widely distributed and abundant pine in MTEs, covering nearly 7 million ha in this region [93], being present in all regions on both shores of the Mediterranean Sea and extending from the Western Mediterranean (Spain, Morocco), where it is most abundant, to Lebanon through Southern France, Italy, Greece and Turkey in South Europe and Algeria, Tunisia, Libya in North Africa. Bioclimatic envelope models predict that the suitable climatic area of *Pinus halepensis* is clearly in expansion [94–96]. Thus, we have selected *Pinus Halepensis* because of its increasing importance and representativeness in the MTEs [97]. Actually, it is the most influential tree species in the total availability of biofuel in the Mediterranean forests [58]. Furthermore, Soriano [58] describes that *Pinus halepensis* is not showing strong variations in its moisture content in the face of seasonal variations, so that possible variations of electrical responses could add more knowledge about the phenological state of the trees in dependence on severe drought conditions, allowing for the integration of these variables in the preventive wildfire management.

As in previously published works [61,98], we decided to use as a study area a representative young forest composed of 93% of *Pinus halepensis* from a post-fire natural regeneration, located within the protected area of the Sierra Calderona Natural Park in Gátova, Valencia (Spain). The selected stand is located at latitude 39°45′28.80″ N and longitude 0°30′36.36″ W. The forest stand has a population density of 484 trees/ha, with an average DBH of 12.10 cm, a tree height of 5.16 m, and an age of 27 years (Figure 1).



Figure 1. View of the sample stand (August 2021).

This sample stand was selected because it is an even-aged forest with enough homogeneous trees, within an area not affected by significant natural disturbances, such as recent wildfires, pests, or damage due to hurricanes or heavy snowfall. It was sought that the stand had these conditions of even-age (natural regeneration after a previous wildfire

occurred in summer of year 1994), to reduce the differences between the individuals that are part of the study since, as we have seen in previous works, age is an influencing factor in the amplitude of the electrical signal [98]. The selected stand meets all the characteristics above described, with constant site conditions (soil and water, orientation, and slope).

A soil analysis based on edaphic profiles was carried out to obtain the main soil variables that can influence on the electrical behaviour of the sample trees (Table 1).

Table 1. Soil properties in pilot stand.

Texture (%)			USDA Classification	Field Capacity [%]	Pore Space [%]	Depth [cm]
Sand	Silt	Clay				
20.1	43.6	12.3	Loam			
Moisture Factor	Ph	Electric Conductivity [ds/cm]	Wp [%]			
0.92	8.2	1.869	3.7	11.8	45.66	30

2.3. Selection of Sample Trees

The first phase of this study was carried out on a total of 240 trees, selected following the method described by Hapla and Saborowski [99] and used by other authors [100,101] for sampling representative trees in a forest stand for analysing physical wood characteristics.

Although the electrical measurement process is non-destructive (see Section 2.4.1 (a)), obtaining the moisture content (see Section 2.4.1 (b)) requires cutting plant material (living branches) from the standing trees in different testing times. This is obviously not possible without seriously injuring the trees. To avoid this impact, the total set of 240 trees has been subdivided into 24 groups, i.e., one group of 10 trees per evaluation week. Each weekly sample group was formed by the 10 trees closest to the centre placed ground electrode.

In the second phase of this work, the electrical signal values obtained in previous works [61,98] were measured in fifteen representative trees of the same stand over three years. These trees were also selected using the representative tree selection method described [61,98,99].

2.4. Measurement Procedures

In each of the 24 weeks of the first phase, the values of the two components of the electrical signal (voltage V and short-circuit current ISC) were recorded and the moisture content of ten trees was measured each week.

These measurements were carried out in the 24 hottest and driest weeks of the year, from one month before the start of the official wildfire season in the Region of Valencia/Spain (May 2021) until one month after the end of it (October 2021). All weekly measurements were taken on Saturdays at 12:00 p.m. CET, since this is the time for which wildfire risk predictions are made according to the Fire Weather Index (FWI) system of the Spanish Meteorological Agency (AEMET) [102]. In addition to that, as could be demonstrated in previous works, the central hours of the day, close to the zenith, are the moments in which the tree presents the minimum value of electrical signal [61].

For the second phase, the voltage (V) and short-circuit current (ISC) values used in our previous work [61], were retrospectively evaluated. These electric signal values were collected weekly, using the same data acquisition protocol as used in the present study, since May 2018.

2.4.1. Measurement of Electrical Signal

The values of voltage (V) and short-circuit current (ISC) of the trees were measured between the electrodes inserted in the trunk and the electrode buried in the ground. To

carry out this work, electrodes with the same characteristics as those of our previous works [61,98] as well as those used by other authors [61,76,81,98,103,104] were used.

Two electrode types were used according to their function.

- (a) The electrode used in the tree, made of stainless steel, was inserted directly into the trunk at 1.5 m above the ground at a depth sufficient to ensure contact with the phloem tissue. A screw shape was chosen due to its greater ease of insertion and removal from the trees, causing only a minor wound. In addition, thanks to the screw spiral, these electrodes have a larger contact surface with the vegetative tissue compared to smooth cylindrical electrodes. So, these electrodes were inserted into the trunk ensuring contact with the phloem tissue, by inserting them with a torque wrench, which allowed us to detect the change in tissue hardness. This last action we consider fundamental, since electrical signals are more easily transmitted throughout this tissue, given its lower resistance to electrical flow, compared to other plant tissues [82].
- (b) The second type was a non-polarized platinum electrode [105], which was used as ground reference. These electrodes were buried in the mineral soil at a depth of between 20–25 cm once the top layer of topsoil had been removed. It should be noted that given the natural conditions in which the experiments were carried out, we could not install the reference electrode in a greater depth due to the soil hardness and the presence of rocks.

Both electrodes were connected to the measuring equipment through electrical connectors and a 0.5 mm copper conductor cable insulated with a flexible plastic sheath (CE 0123) (see Figure 2).

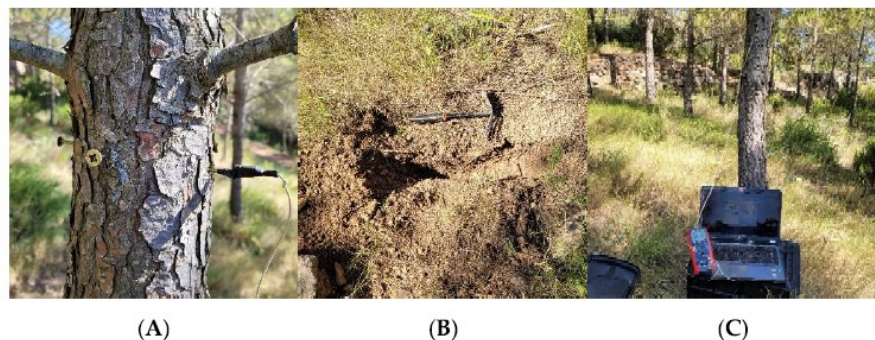


Figure 2. Tree electrode (A), ground electrode placement (B), arrangement of measuring equipment (C).

The equipment used for the voltage (V) and short-circuit current (ISC) measurement was a multimeter UT71D UNIT with an input impedance of $2.5 \text{ G}\Omega$ and a precision of $0.1\% \pm 2 \text{ mV}$.

2.4.2. Measurement of Moisture Content

Physical samples were taken to the laboratory, following the methodological recommendations of the National Forest Research Institute of Spain [106,107].

1. Field work: The following samples were taken from the first live and healthy branch from the bottom of the tree-crown: Fraction 1 (BB): samples were taken from the base of the branch on a weekly frequency, with diameters of 20–30 mm and 5–10 cm length, without needles, in order to compare it with the non-destructive moisture content methodology. Fraction 2 (BM): samples were taken from the middle of the branch on a monthly frequency, with diameters of 10–20 mm and 5–10 cm length, without needles. Fraction 3 (LF): samples were taken from end part of the branch on a monthly

frequency, with diameters <10 mm, with twigs and needles, without cones. Samples were taken always on Saturdays between 12:05 and 2:00 pm CEST. Each sample was placed in a hermetically sealed plastic container, identified with the reference data and transported immediately to the laboratory.

- Laboratory work: The samples were weighed on a precision balance in the green state. After being dried in an oven at 105 °C for 24 h until constant weight was obtained, they were weighed in anhydrous state. The moisture content (MC%) is calculated with the formula:

$$MC\% = \frac{\text{wet weight} - \text{weight after drying}}{\text{weight after drying}} * 100$$

2.5. Meteorological Time-Series

The meteorological data for the area was provided by a professional meteorological station installed at 39°46'10.12" N, 00°31'14.19" W. The meteorological station is a Davis Vantage VUE model owned by the Valencian Meteorological Association (AVAMET) [108].

2.6. Wildfire Risk Assessment

The Spanish State Meteorological Agency (AEMET) publishes the official FWI daily [104]. The data is open and available online through its web services. We have used the data recorded to the region of Valencia, defined as Zone 3, where our pilot stand is located. The FWI levels are coloured from green (low risk) to red (extreme risk).

3. Results and Discussions

3.1. Comparison between Moisture Content in Different Live Branch Fractions

Figure 3 shows the obtained laboratory data for the moisture content in the three branch fractions during the six months of measurement. For all measurements taken during this period, the mean value obtained for the moisture content measured at the branch base (BBMC%) is 91.92%, with a standard deviation of $\text{std} \pm 9.12\%$, very similar to the mean value for the moisture content measured at the middle of the branch (BMMC% = 91.18%, $\text{std} \pm 12.06\%$) and slightly under the mean value obtained for the fine live fuel moisture content (LFMC% = 98.17%, $\text{std} \pm 10.27\%$). Other authors reported very similar LFMC% measured in needles and twigs for Mediterranean pines [18,58,109].

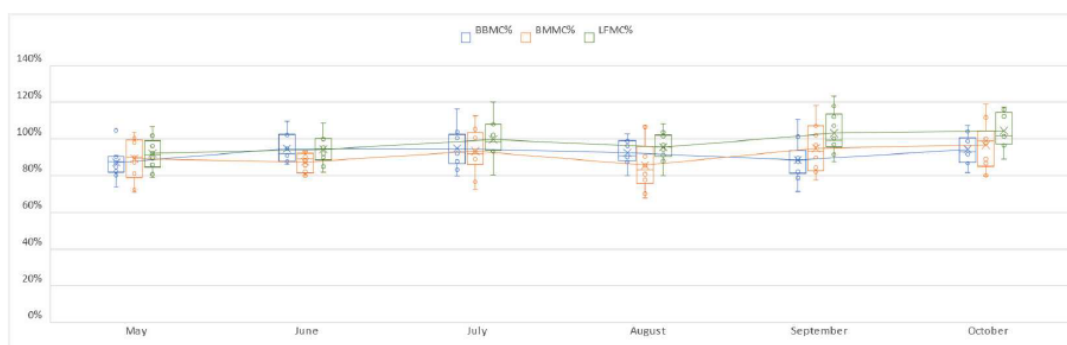


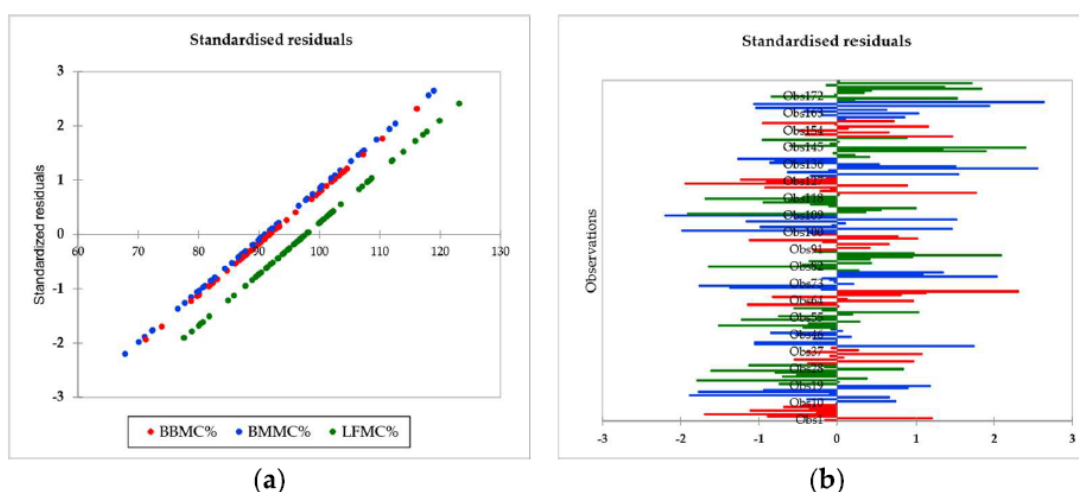
Figure 3. Comparison between moisture content in different branch fractions of *Pinus halepensis* from May to October 2021: branch base (BBMC%, middle of the branch (BMMC%) and fine live fuel (LFMC%).

In order to analyse possible significance differences among BBMC%, BMMC% and FMC%, several ANOVA tests are performed for the total sampling period and for each month among the three fractions. Table 2 shows the results.

Table 2. Results of the analysis of variance (ANOVA) among BBMC%, BMMC% and LFMC%.

Sample	F	Pr > F	p-Value	α	Result
May	0.714	0.499	0.381	0.05	non-significant differences
June	1.278	0.295	0.837	0.05	non-significant differences
July	1.211	0.314	0.863	0.05	non-significant differences
August	1.461	0.250	0.295	0.05	non-significant differences
September	3.793	0.035	0.646	0.05	non-significant differences
October	2.516	0.100	0.389	0.05	non-significant differences
Total Period	7.367	0.001	0.208	0.05	non-significant differences

Although the values obtained for LFMC% are slightly higher than BBMC% and BMMC% for the total sample, as well as for the individual months (between 5 and 10%), the variance analysis demonstrate that these differences are non-significant, neither for the individual samples in each month nor for the total sample. The standardised residual analyses shown in Figure 4 also demonstrate this result.

**Figure 4.** Standardised residual analyses among BBMC%, BMMC% and LFMC% for the total period (a) and standardised residual vs total observations (b).

The results obtained demonstrate that there are non-significant differences among the moisture content among the three branch fractions (BBMC%, BMMC% and LFMC%). In this sense, samples of live branches bases can be representative for the moisture content for entire live fuel. Following Mitsopoulos and Dimitrakopoulos [110], the live aerial fuels that are consumed during crown fires in *Pinus halepensis* forests are composed of needles (16.7%), twigs with 0.0–0.63 cm diameter (12.6%), branches with 0.64–7.5-cm diameter (62.7%), and branches >7.5-cm diameter (3.7%). Taking BBMC% as a reference measurement at the base of the first living branch in standing trees opens an opportunity to monitoring through sensorised moisture meters, e.g., by electrical resistance or capacitive devices.

3.2. Seasonal Variability of Live Fuel Moisture Content

Figure 5 visually shows the values obtained for the moisture content of the three fractions (BBMC%, BMMC% and LFMC%) of the first living branch during the 24 weeks measurement in the critical wildfire risk season, i.e., from late spring to early autumn 2021.

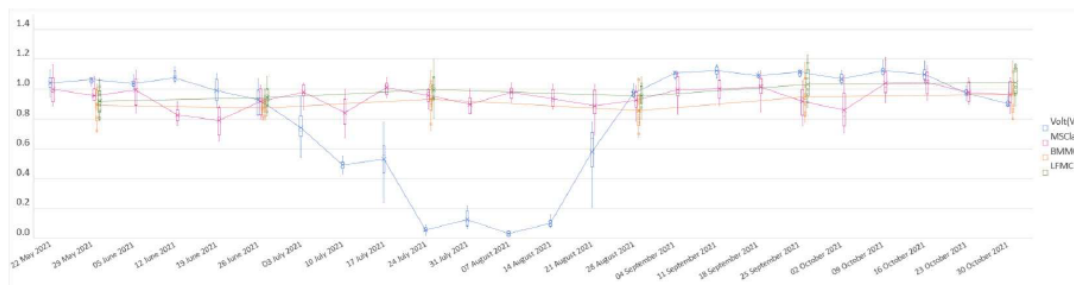


Figure 5. Seasonal variability of moisture content of the first living branch (BBMC%, BMMC% and LPMC%) in comparison with voltage during the 24 weeks from late spring to early autumn 2021.

The first visual analysis indicates that *Pinus halepensis* does not present clear seasonal variations of moisture content, neither in the woody fractions of the branches (BBMC% and BMMC%) nor in the fine live material (LPMC%), even during the water stress conditions of the hot and dry summer weeks. An ANOVA test among the 24 mean values of the weekly measurements for BBMC% shows also non-significant differences ($F = 1.38, p < 0.001$). Furthermore, non-significant differences can be demonstrated among the monthly measurements of BBMC% ($F = 1.34, p < 0.001$) as well as LPMC% ($F = 2.75, p < 0.001$). Finally, Figure 5 also shows through the Box and Whiskers plots that the variation among the 10 measured trees in each measurement trial is very low. Additional individual ANOVA tests demonstrate the non-significant differences of moisture content for the three variables (BBMC%, BMMC% and LPMC%) among trees ($p < 0.001$). Other authors reported very similar behaviour of LPMC% of Mediterranean pines [18,58,109], also not being able to demonstrate representative and significance seasonal variations.

3.3. Seasonal Variability of Electrical Signals in the Trees

Table 3 present the total results obtained for the electric signal measurements: voltage (V) and short-circuit current (ISC). Both V and ISC present much higher variations than the moisture measurements. So, V has an average value of $V = 0.808$ V with very high standard deviation ($\text{std} = \pm 0.381$ V) and variance. The same heterogeneous behaviour present ISC with an average value of $\text{ISC} = 1.998$ mA and $\text{std} = \pm 2.531$ mA.

Table 3. Descriptive statistics for the results of voltage (V) and short-circuit current (ISC) from 240 samples measured in 24 weeks from late spring to early autumn 2021.

	Electrical Signals	
	Voltage (V) [V]	Short-Circuit Current (ISC) [μA]
Mean	0.808	1.998
Median	0.990	1.100
Minimum	0.032	0.000
Maximum	1.124	15.690
Standard deviation (n – 1)	0.381	2.531
1st Quartile	0.569	0.238
3rd Quartile	1.081	2.735
Variance (n – 1)	0.145	6.408

These heterogeneous values can be explained by the analysis of the seasonal variations. So, Figure 5 also shows the results obtained for the voltage (V) measured in the trees during the 24 weeks of higher wildfire risk from late spring to early autumn 2021.

The results obtained clearly show that the electrical signals measured in the trees coincide with the two growth seasons of *Pinus halepensis*, specifically spring and autumn [111,112]. Therefore, with this, we can associate the moments in which the environmental conditions are favourable for the growth of the trees with the highest values of the electrical signal. On the contrary, the periods in which the environmental conditions become more difficult for the survival of the pines, specifically during heavy drought conditions of continuous lack of rain and very high temperatures, the tree gives us a clear reduction in the electrical signal, which is observed more clearly in the case of voltage (V), with reductions of up to 90% and, in any case, of more than 50%.

Hence, the seasonal variations of voltage in *Pinus halepensis* observed can be interpreted as a direct result of a loss of conductivity during the strong climatic conditions in the driest summer days. In this sense, Fotelli et al. [113] demonstrate that during xerothermic periods, *Pinus halepensis* has typical isohydric behaviour: maximum photosynthesis, sap flow and stomatal conductance declined through stomatal control to limit water potential reduction and loss of conductivity. This loss of sap flow and conductivity has been also observed in several studies [114]. Electrical responses such as voltage seem to be directly related with sap flow conductivity, so that further research activity to analyse in detail this relationship should be carried out.

3.4. Relationship between Live Fuel Moisture and Electrical Signals

As shown in the previous chapters, the live fuel moisture content of *Pinus halepensis* do not present significant variations throughout the warmest and driest part of the year, without showing a significant decrease in the hot summer months, on the contrary that the electrical signals do, especially the voltage. So, the detailed analysis shows that the voltage curves remain more or less constant during the months of May and June, as well as from the beginning of September to the end of October. However, as soon as extreme summer conditions with high temperatures and very low rainfall dominate the central summer months (July and August), the voltage values drop very clearly and significantly. The more or less constant voltage of around 1 V decreases clearly under <0.5 V under the nine weeks between beginning July and End of August, and even dramatically during the central weeks of end of July and beginning of August with <0.1 V. In fact, the moisture content and voltage curves are closely aligned during May and June, decoupling very clearly during the central part of the summer in July and August, and re-coupling from the beginning of September.

Moreover, Figures 6 and 7 show that precipitation, temperature, and relative air humidity do not exert a direct influence on live fuel moisture content of *Pinus halepensis*. Not even noticeable changes in BBMC%, BMMC% or LFMC% can be observed on the central summer weeks of end of July and beginning of August, with the hottest and driest days, especially the 24 July and 7 August 2021, which were classified as an extreme risk by the weather and firefighting agencies, following the FWI criteria [102].

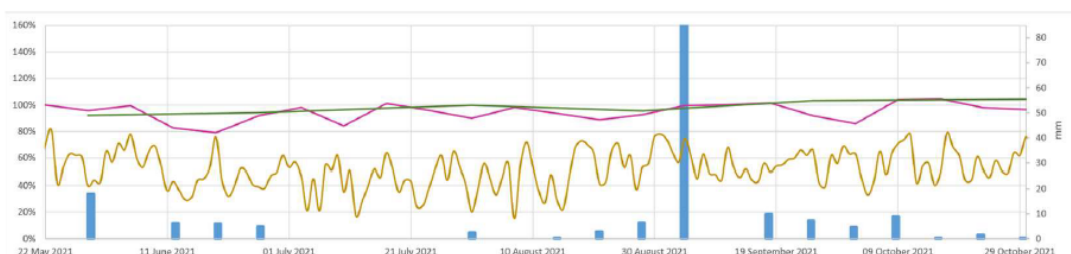


Figure 6. Moisture content (BBMC%, purple line and LFMC%, green line) vs. weekly-accumulated precipitation (blue column) and relative humidity (light brown line) during the 24 weeks study.

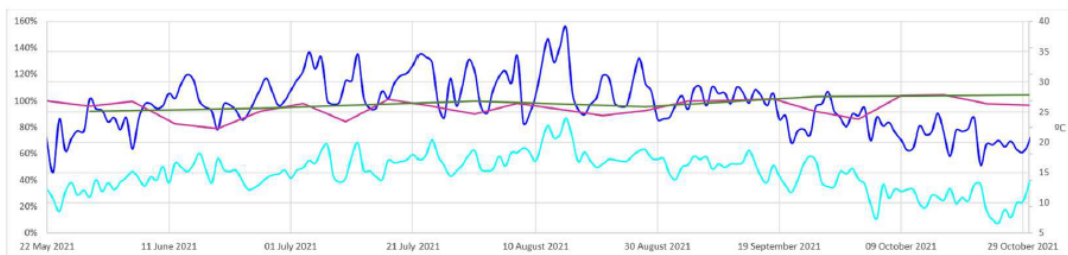


Figure 7. Moisture content (BBMC%, purple line and LFCM%, green line) vs. maximum (dark blue line) and minimum (light blue line) daily temperatures.

The results obtained demonstrate that the moisture content (BBMC% or even LFCM%) do not present representative seasonal variations in *Pinus halepensis* and is not able to react directly or quickly to extreme drought conditions. Characterization of the fuel structure and its relevance for fire behaviour has been the topic of much research in MTEs [115]. Thus, variations in LFCM% are often taken into account, although some discussions are still active on its role in fire propagation [116]. Some studies have addressed the role of FMC on fire behaviour [117]. Others have addressed how canopy drying, following bark beetle attacks, for instance, impacts fire behaviour [118–120].

In our research, the moisture content measured at the living branches of *Pinus halepensis* (including LFCM%) shows no representative seasonal variations, with values between 80 and 100%, which is consistent with other studies with this species [109]. Although LFCM% is considered as an important determinant of forest flammability under Mediterranean conditions [45], other authors demonstrate that even other Mediterranean pines show also very limited LFCM% seasonal variations: *Pinus pinaster* 90%–100% [121] and *Pinus nigra*: 95%–115% [122]. These pines exhibit isohydric behaviour [113], i.e., little variation in midday leaf water potential, and relatively tight regulation of stomata in response to soil drying [122]. Mediterranean pines are adapted to the xerothermic conditions (high temperatures and droughts) of summertime, due to its drought avoidance strategy of reducing stomatal conductance under water shortage [123]. *Pinus halepensis* displayed a water-saving, drought avoidance (isohydric) strategy via stomatal control in response to summer drought [124,125]. The species benefited from periods of high available soil water (normally autumn to spring) [126,127]. These drought episodes do not influence directly moisture content at branches and leaf level [58,128], so that direct measurement of LFCM% of Mediterranean pines should not be considered as the only appropriate indicator to monitor wildfire risk. Moreover, strong drought conditions and consequently high evapotranspiration carries physiological responses in branches and needles of *Pinus halepensis*. Thus, Fotelli et al. [113] demonstrate that during xerothermic periods, typical isohydric behaviour was exhibited by *Pinus halepensis*: maximum photosynthesis, sap flow and stomatal conductance declined through stomatal control to limit water potential reduction and loss of conductivity. This loss of sap flow and conductivity has been also observed in several studies [114]. However, in periods when water availability was not a limiting factor, this species was able to maximize its carbon gain if other controlling parameters, such as air temperature and net radiation, simultaneously ensured a favourable environmental regime [113].

On the contrary, LFCM% does present representative seasonal variations in some Mediterranean shrub species. Thus, compared to the results obtained for *Pinus halepensis* (and those observed for other Mediterranean pines), the main shrubs that are part of MTEs behave significantly differently [129]. Especially relevant is the seasonal variation in LFCM% of *Rosmarinus officinalis*, with minimum values of 40% in summer and maximum values of 140% in autumn, winter, and spring [19,109,112]. Also, other species, e.g., *Ulex parviflorus* (60%–120%), *Erica multiflora* (50%–90%) or *Juniperus oxycedrus* (65%–100%)

shows very clear seasonal variations [58,111]. This undoubtedly explains the importance that the summer drop in the LFCM% has on the vulnerability of wildfire in shrublands [130]. Undoubtedly, for future research, it would be very interesting to relate the variation in the LFCM% and its relationship with the voltage in these shrubs, as they have shown very similar behaviour patterns.

Following our results, it seems to be very difficult to assess and monitor vulnerability of Mediterranean pine forests to wildfire risk only in dependence on LFCM% of pine trees. Additionally, other physiological plant traits seem to better explain the high wildfire risk in times of drought, especially osmotic potential, sap flow, wilting and needle senescence or dead fuel presence and evolution. Fuel dynamics, as a result of the physiological response of the pine trees to drought conditions, have to be analysed integrating variables resulting from water stress (soil water content and plant traits, including rooting patterns, and leaf traits such as the turgor loss point, osmotic potential, sap flow, elasticity and leaf mass per area), but also the ratio of dead to live fuels [131,132]. In this sense, needle cavitation and subsequent shedding is of particular relevance for pines, transforming green live fuel into dead fuel, which are totally dry, and thus easier to ignite [45]. Therefore, it is necessary to investigate the seasonal fuel dynamics from a more integral perspective, complementing the measurement of LFCM%. All variables resulting from physiological responses that can influence fire risk and that can be easily measured and monitored, including electrical signals, should be integrated into the risk models.

3.5. Relationship between Electric Signals and Wildfire Risk

(a) Assessment for the 24 weeks study in year 2021

A first analysis of the relationship between the electrical signals and the wildfire risk has been carried out, by comparing the mean values of both V and the ISC for each week (always measured on Saturdays) with the wildfire risk following the FWI criteria of those same days, considering for this daily maximum temperature, minimum relative humidity, maximum wind speed and rainfall. The results obtained are shown graphically in Figures 8 and 9.

The results obtained cannot demonstrate a representative correlation between moisture content and FWI. The highest FWI values, and consequently the brunt of the fire season in the Western Mediterranean Basin occurs normally during July [132], while the observed moisture content values do not show any reduction, as also observed by Qi et al. [131]. Soler Martin et al. [121] demonstrate that no seasonal changes of LFCM were recorded during summer in needles and small branches in *Pinus pinaster* stands, contrary to predictions from the FWI, which fully matches with the results obtained in our study for *Pinus halepensis*.

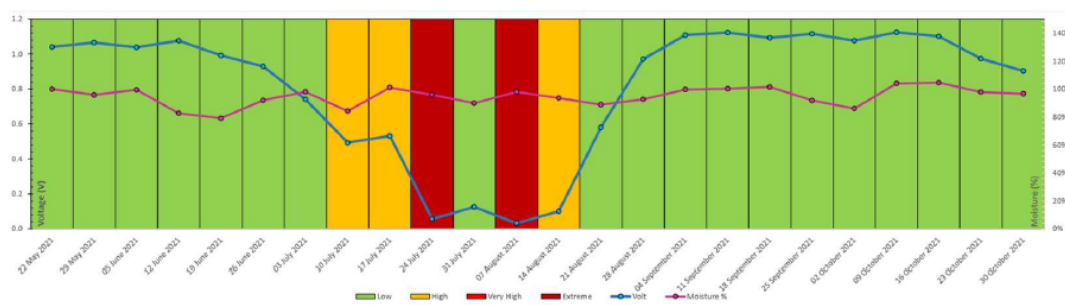


Figure 8. Mean values of V (blue line) and BBMC% (pink line) vs. FWI classification of the measurements according to FWI criteria during the 24 weeks study (background colour).

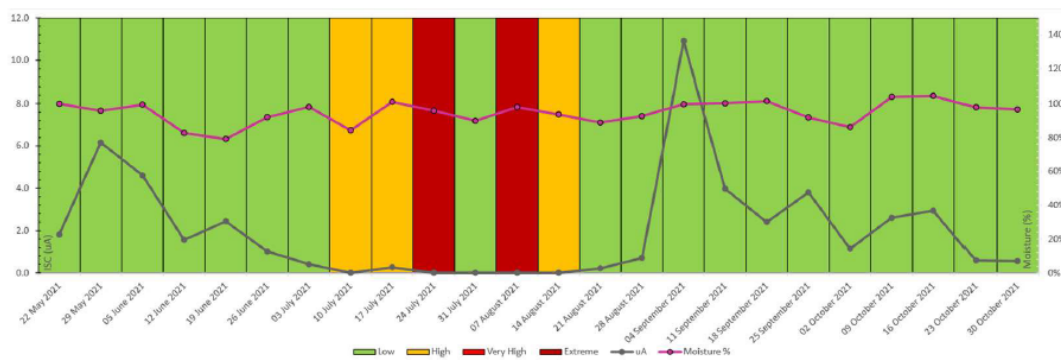


Figure 9. Mean values of ISC (tagged uA in the figure with a dark grey line) and BBMC% (pink line) vs. FWI classification of the measurements according to FWI criteria during the 24 weeks study (background colour).

These results demonstrate that both electrical signals measured (V and ISC) show a noticeable reduction during the summer period, reaching the minimum values on the days in which the FWI in the pilot stand was classified as extreme [102]. However, the results for V are much clearer and more significant related to FWI than the results obtained for ISC.

(b) Assessment for three years survey (2018–2021)

Measurements for electrical signals, specifically voltage, have been performed in the pilot stand since May 2018 until October 2021, so that we can make a long-term evaluation of the relationship between V and FWI. Figure 10 shows in Box and Whiskers plots the average, standard deviation and minimum-maximum for all days during the three years classified by wildfire risk categories (low, high, very high, extreme) following FWI criteria.

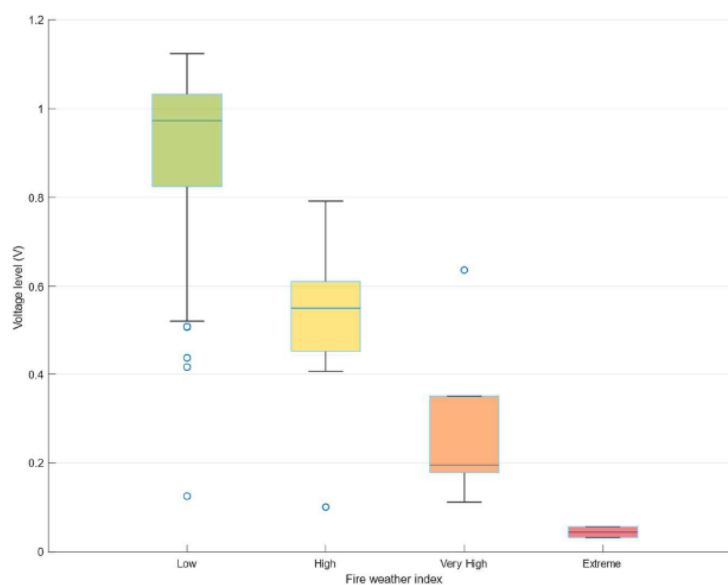


Figure 10. Voltage values for all measured days from May 2018 to October 2021 classified by FWI categories (low, high, very high and extreme wildfire risk).

The first interpretation of the results allows us to observe that the mean values obtained for V in the four FWI categories are significantly different, clearly reducing the voltage as

the risk increases. An ANOVA test also corroborates the observed differences as statistically highly significant ($F = 39.138$, $p < 0.001$). Thus, while FWI low presents an average of 0.90 V, the FWI high class decreases to 0.53 V and the FWI very high class to 0.28 V, with the FWI extreme class reaching a mean of only 0.04 V.

Finally, this analysis also shows that on days with low fire risk (FWI low) practically all the values (96%) greatly exceed >0.5 V. Even 81% exceed the threshold of >0.8 V. On the other side, on the days classified as very high risk (FWI very high) and extreme risk (FWI extreme), only one of all values (88%) exceed >0.4 V, even 100% of the extreme risk does not exceeds even >0.1 V.

The voltage level is a result of the physiological response of *Pinus halepensis* to the abiotic stress of drought in summer. It is an easy-to-measure electrical parameter as well as a very reliable indicator with a high correlation [133] with wildfire risk. Having obtained a Spearman's Rank correlation coefficient of 0.6816 (p -value < 0.001) between the FWI index and the raw voltage values for the 24-week study in 2021, the same test for the period 2018–2021 increases to 0.7816 (p -value < 0.001). We have to notice, that our research is a pioneer study to link electrical signals with plant physiology in a context of wildfire risk management, and our findings demonstrate the potential of incorporating electrical responses as one of the ecophysiological plant traits to investigating seasonal changes in wildfire ignition risk and flammability.

4. Conclusions

The most important conclusions that we can draw from the research are the following:

- No significant differences have been observed between the moisture content of the different fractions of the branches of *Pinus halepensis* (base of the branch, half of the branch and twigs and needles as live fuel), even in times of drought with hydric stress and very high temperatures.
- Live fuel moisture content has not shown significant variations under the influence of extreme fire risk factors in the summer time. For this reason, it should be complemented by other reliable variables for fire risk assessment and monitoring in MTEs dominated by *Pinus halepensis*. Thus, other plant physiological traits have to be integrated in the assessment and modelling of the high risk of wildfires in *Pinus halepensis* stands in times of water stress and high temperatures, related both to hydraulic dynamics (osmotic potential, sap flow) and dead fuel (wilting and needle senescence, dead fuel presence and evolution). However, as LFMC% responds better to fire risk conditions in some shrub species in MTEs, we propose to analyse in-depth the relationship between LFMC% and electrical responses in these shrubs.
- The variations registered in the electrical signal generated in *Pinus halepensis* show oscillations with significant variations, which are strongly correlated with the periods of extremely favourable meteorological conditions for wildfires (Spearman rho of 0.78).
- The voltages measured show ranges that correspond with great accuracy to the official fire risk levels based on the FWI system.
- The electrical signals, specifically voltage, are a result of the physiological response of the Mediterranean pine trees to the abiotic stress of drought in summer. It is an easy-to-measure electrical parameter as well as a very reliable indicator with a high correlation with wildfire risk.
- Electrical responses could add more knowledge about the phenological state of the trees in dependence on stress climatic conditions, allowing for the integration of these variables in the preventive wildfire management. Although for this we also consider that a more in-depth investigation is necessary.
- Finally, the results obtained and the knowledge gained allows for the exploration of new possibilities for the development of wireless terrestrial sensors based on voltage measurement, which allow online monitoring of the risk of wildfire ignition and propagation with potentially maximum spatial and temporal resolution.

Author Contributions: Conceptualization and methodology, R.Z., J.-V.O.-V. and M.A.M.P.; validation, L.-G.L.-Z., J.-V.O.-V., M.A.M.P. and J.E.L.; formal analysis, R.Z. and J.-V.O.-V.; investigation, R.Z.; writing—original draft preparation, R.Z., J.-V.O.-V., M.A.M.P. and J.E.L.; writing—review and editing, R.Z., J.-V.O.-V., M.A.M.P., L.-G.L.-Z. and J.E.L.; supervision, J.-V.O.-V. and L.-G.L.-Z. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: This research received no external funding.

Data Availability Statement: Not applicable.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

- Naveh, Z. The evolutionary significance of fire in the Mediterranean region. *Vegetatio* **1975**, *29*, 199–208. [\[CrossRef\]](#)
- Bodí, M.B.; Muñoz-Santa, I.; Armero, C.; Doerr, S.H.; Mataix-Solera, J.; Cerdà, A. Spatial and temporal variations of water repellency and probability of its occurrence in calcareous Mediterranean rangeland soils affected by fires. *Catena* **2013**, *108*, 14–25. [\[CrossRef\]](#)
- Pausas, G.J.; Keeley, J.E. A burning story: The role of fire in the history of life. *BioScience* **2009**, *59*, 593–601. [\[CrossRef\]](#)
- McLauchlan, K.K.; Higuera, P.E.; Miesel, J.; Rogers, B.M.; Schweitzer, J.; Shuman, J.K.; Tepley, A.J.; Varner, J.M.; Veblen, T.T.; Adalsteinsson, S.A.; et al. Fire as a fundamental ecological process: Research advances and frontiers. *J. Ecol.* **2020**, *108*, 2047–2069. [\[CrossRef\]](#)
- Hoerling, M.; Eischeid, J.; Perlwitz, J.; Quan, X.; Zhang, T.; Pegion, P. On the increased frequency of Mediterranean drought. *J. Clim.* **2012**, *25*, 2146–2161. [\[CrossRef\]](#)
- Rundel, P.W. Landscape disturbance in Mediterranean-type ecosystems: An overview. In *Landscape Disturbance and Biodiversity in Mediterranean-Type Ecosystems*; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 1998; pp. 3–22. [\[CrossRef\]](#)
- Kelly, A.E.; Goulden, M.L. A montane Mediterranean climate supports year-round photosynthesis and high forest biomass. *Tree Physiol.* **2016**, *36*, 459–468. [\[CrossRef\]](#)
- Montenegro, G.; Ginocchio, R.; Segura, A.; Keely, J.E.; Gómez, M. Regímenes de incendios y respuestas de la vegetación en dos regiones de clima mediterráneo. *Rev. Chil. De Hist. Nat.* **2004**, *77*, 455–464.
- Ramírez-Valiente, J.A.; del Blanco, L.S.; Alía, R.; Robledo-Arnuncio, J.J.; Climent, J. Adaptation of Mediterranean forest species to climate: Lessons from common garden experiments. *J. Ecol.* **2022**, *110*, 1022–1042. [\[CrossRef\]](#)
- Vasilakos, C.; Kalabokidis, K.; Hatzopoulos, J.; Kallos, G.; Matsinos, Y. Integrating new methods and tools in fire danger rating. *Int. J. Wildland Fire* **2007**, *16*, 306–316.
- Boer, M.M.; Nolan, R.H.; De Dios, V.R.; Clarke, H.; Price, O.F.; Bradstock, R.A. Changing weather extremes call for early warning of potential for catastrophic fire. *Earth's Future* **2017**, *5*, 1196–1202. [\[CrossRef\]](#)
- Dahanayake, K.C.; Chow, C.L. Moisture content, ignitability, and fire risk of vegetation in vertical greenery systems. *Fire Ecol.* **2018**, *14*, 125–142. [\[CrossRef\]](#)
- Capps, S.B.; Zhuang, W.; Liu, R.; Rolinski, T.; Qu, X. Modelling chamise fuel moisture content across California: A machine learning approach. *Int. J. Wildland Fire* **2021**, *31*, 136–148. [\[CrossRef\]](#)
- Castro, F.; Tudela, A.; Sebastià, M.T. Modeling moisture content in shrubs to predict fire risk in Catalonia (Spain). *Agric. For. Meteorol.* **2003**, *116*, 49–59. [\[CrossRef\]](#)
- Dennison, P.E.; Moritz, M.A. Critical live fuel moisture in chaparral ecosystems: A threshold for fire activity and its relationship to antecedent precipitation. *Int. J. Wildland Fire* **2009**, *18*, 1021–1027. [\[CrossRef\]](#)
- Dimitrakopoulos, P.A.; Bemmerzouk, A.M. Predicting live herbaceous moisture content from a seasonal drought index. *Int. J. Biometeorol.* **2003**, *47*, 73–79. [\[CrossRef\]](#) [\[PubMed\]](#)
- Holden, A.Z.; Jolly, W.M. Modeling topographic influences on fuel moisture and fire danger in complex terrain to improve wildland fire management decision support. *For. Ecol. Manag.* **2011**, *262*, 2133–2141. [\[CrossRef\]](#)
- Nolan, R.H.; Boer, M.M.; de Dios, V.R.; Caccamo, G.; Bradstock, R.A. Large-scale, dynamic transformations in fuel moisture drive wildfire activity across southeastern Australia. *Geophys. Res. Lett.* **2016**, *43*, 4229–4238. [\[CrossRef\]](#)
- Pellizzaro, G.; Duce, P.; Ventura, A.; Zara, P. Seasonal variations of live moisture content and ignitability in shrubs of the Mediterranean Basin. *Int. J. Wildland Fire* **2007**, *16*, 633–641. [\[CrossRef\]](#)
- Pivovarov, A.L.; Emery, N.; Sharifi, M.R.; Witter, M.; Keeley, J.E.; Rundel, P.W. The effect of ecophysiological traits on live fuel moisture content. *Fire* **2019**, *2*, 28. [\[CrossRef\]](#)
- Ruffault, J.; Martin-StPaul, N.; Pimont, F.; Dupuy, J.-L. How well do meteorological drought indices predict live fuel moisture content (LFMC)? An assessment for wildfire research and operations in Mediterranean ecosystems. *Agric. For. Meteorol.* **2018**, *262*, 391–401.
- Chou, D.M.; Suarez, M.J. A Solar Radiation Parameterization (CLIRAD-SW) Developed at Goddard Climate and Radiation Branch for Atmospheric Studies. NASA Technical Memorandum. U.S. Patent NASA/TM-1999-104606 15, 1 June 1999.
- Chuvieco, E.; Aguado, I.; Dimitrakopoulos, A.P. Conversion of fuel moisture content values to ignition potential for integrated fire danger assessment. *Can. J. For. Res.* **2004**, *34*, 2284–2293. [\[CrossRef\]](#)

24. Danson, F.; Bowyer, P. Estimating live fuel moisture content from remotely sensed reflectance. *Remote Sensing of Environment* **2004**, *92*, 309–321. [[CrossRef](#)]
25. Jurdao, S.; Chuvieco, E.; Arevalillo, J.M. Modelling fire ignition probability from satellite estimates of live fuel moisture content. *Fire Ecol.* **2012**, *8*, 77–97. [[CrossRef](#)]
26. Myoung, B.; Kim, S.H.; Nghiem, S.V.; Jia, S.; Whitney, K.; Kafatos, M.C. Estimating live fuel moisture from MODIS satellite data for wildfire danger assessment in Southern California USA. *Remote Sens.* **2018**, *10*, 87. [[CrossRef](#)]
27. Peterson, S.H.; Roberts, D.A.; Dennison, P.E. Mapping live fuel moisture with MODIS data: A multiple regression approach. *Remote Sens. Environ.* **2008**, *112*, 4272–4284. [[CrossRef](#)]
28. Qi, Y.; Dennison, P.E.; Spencer, J.; Riaño, D. Monitoring live fuel moisture using soil moisture and remote sensing proxies. *Fire Ecol.* **2012**, *8*, 71–87. [[CrossRef](#)]
29. Rao, K.; Williams, A.P.; Flefil, J.F.; Konings, A.G. SAR-enhanced mapping of live fuel moisture content. *Remote Sens. Environ.* **2020**, *245*, 111797. [[CrossRef](#)]
30. Yebra, M.; Dennison, P.E.; Chuvieco, E.; Riaño, D.; Zylstra, P.; Hunt, E.R., Jr.; Danson, F.M.; Qi, Y.; Jurdao, S. A global review of remote sensing of live fuel moisture content for fire danger assessment: Moving towards operational products. *Remote Sens. Environ.* **2013**, *136*, 455–468. [[CrossRef](#)]
31. Yebra, M.; Quan, X.; Riaño, D.; Larraondo, P.R.; van Dijk, A.I.; Cary, G.J. A fuel moisture content and flammability monitoring methodology for continental Australia based on optical remote sensing. *Remote Sens. Environ.* **2018**, *212*, 260–272. [[CrossRef](#)]
32. Jain, P.; Coogan, S.C.P.; Subramanian, S.G.; Crowley, M.; Taylor, S.W.; Flannigan, M.D. A review of machine learning applications in wildfire science and management. *Environ. Rev.* **2020**, *28*, 478–505. [[CrossRef](#)]
33. McCandless, T.C.; Kosovic, B.; Petzke, W. Enhancing wildfire spread modelling by building a gridded fuel moisture content product with machine learning. *Mach. Learn. Sci. Technol.* **2020**, *1*, 035010. [[CrossRef](#)]
34. Michael, Y.; Helman, D.; Glickman, O.; Gabay, D.; Brenner, S.; Lensky, I.M. Forecasting fire risk with machine learning and dynamic information derived from satellite vegetation index time-series. *Sci. Total Environ.* **2021**, *764*, 142844. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
35. Corona, P.; Ascoli, D.; Barbati, A.; Bovio, G.; Colangelo, G.; Elia, M.; Garfi, V.; Iovino, F.; Laforteza, R.; Leone, V.; et al. Integrated forest management to prevent wildfires under Mediterranean environments. *Ann. Silv. Res.* **2015**, *39*, 1–22. [[CrossRef](#)]
36. Schultz, C.A.; Thompson, M.P.; McCaffrey, S.M. Forest Service fire management and the elusiveness of change. *Fire Ecol.* **2019**, *15*, 13. [[CrossRef](#)]
37. Dimitrakopoulos, A.P.; Bemmerzouk, A.M.; Mitsopoulos, I.D. Evaluation of the Canadian fire weather index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorol. Appl.* **2011**, *18*, 83–93. [[CrossRef](#)]
38. Wang, X.; Wotton, B.M.; Cantin, A.S.; Parisien, M.-A.; Anderson, K.; Moore, B.; Flannigan, M.D. cffdrs: An R package for the Canadian forest fire danger rating system. *Ecol. Processes* **2017**, *6*, 5. [[CrossRef](#)]
39. Ye, T.; Wang, Y.; Guo, Z.; Li, Y. Factor contribution to fire occurrence, size, and burn probability in a subtropical coniferous forest in East China. *PLoS ONE* **2017**, *12*, e0172110. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
40. Chas-Amil, M.L.; Touza, J.M.; Prestemon, J.P.; McClean, C.J. Natural and social factors influencing forest fire occurrence at a local spatial scale. In *Modelling Fire Behavior and Risk*; Donatella, S., Valentina, B., Michele, S., Costatino, S., Eds.; Global Fire Monitoring Center: Freiburg, Germany, 2012; pp. 181–186.
41. Romps, D.M.; Seeley, J.T.; Vollaro, D.; Molinari, J. Projected increase in lightning strikes in the United States due to global warming. *Science* **2014**, *346*, 851–854. [[CrossRef](#)] [[PubMed](#)]
42. Krause, A.; Kloster, S.; Wilkenskjaeld, S.; Paeth, H. The sensitivity of global wildfires to simulated past, present, and future lightning frequency. *J. Geophys. Res. Biogeosciences* **2014**, *119*, 312–322. [[CrossRef](#)]
43. Quilez, R.; Merida, E. *Manual de Seguridad en Operaciones de Extinción de Incendios Forestales*; Pau Costa Foundation: Barcelona, Spain, 2015; 333p, ISBN 978-84-617-1323-3.
44. Karavani, A.; Boer, M.M.; Baudena, M.; Colinas, C.; Díaz-Sierra, R.; Pemán, J.; de Luis, M.; Enríquez-de-Salamanca, Á.; Resco de Dios, V. Fire-induced deforestation in drought-prone Mediterranean forests: Drivers and unknowns from leaves to communities. *Ecol. Monogr.* **2018**, *88*, 141–169. [[CrossRef](#)]
45. Nolan, R.H.; Blackman, C.J.; de Dios, V.R.; Choat, B.; Medlyn, B.E.; Li, X.; Bradstock, R.A.; Boer, M.M. Linking forest flammability and plant vulnerability to drought. *Forests* **2020**, *11*, 779. [[CrossRef](#)]
46. Pellizzaro, G.; Cesaraccio, C.; Duce, P.; Ventura, A.; Zara, P. Relationships between seasonal patterns of live fuel moisture and meteorological drought indices for Mediterranean shrubland species. *Int. J. Wildland Fire* **2007**, *16*, 232–241. [[CrossRef](#)]
47. Turco, M.; von Hardenberg, J.; AghaKouchak, A.; Llasat, M.C.; Provenzale, A.; Trigo, R.M. On the key role of droughts in the dynamics of summer fires in Mediterranean Europe. *Sci. Rep.* **2017**, *7*, 81. [[CrossRef](#)]
48. Boer, M.M.; De Dios, V.R.; Bradstock, R.A. Unprecedented burn area of Australian mega forest fires. *Nat. Clim. Chang.* **2020**, *10*, 171–172. [[CrossRef](#)]
49. Reddy, P.J.; Sharples, J.J.; Lewis, S.C.; Perkins-Kirkpatrick, S.E. Modulating influence of drought on the synergy between heatwaves and dead fine fuel moisture content of bushfire fuels in the Southeast Australian region. *Weather Clim. Extrem.* **2021**, *31*, 100300. [[CrossRef](#)]
50. Littell, J.S.; Peterson, D.L.; Riley, K.L.; Liu, Y.; Luce, C. A review of the relationships between drought and forest fire in the United States. *Glob. Chang. Biol.* **2016**, *22*, 2353–2369. [[CrossRef](#)]

51. Monroe, D.C.; Blumenfeld, R.S.; Keator, D.B.; Solodkin, A.; Small, S.L. Post-fire regeneration variability of *Pinus halepensis* in the eastern Iberian Peninsula. *For. Ecol. Manag.* **2004**, *203*, 251–259. [CrossRef]
52. Varol, T.; Ertuğrul, M.; Özel, H.B. Drought-Forest Fire Relationship. In *Mediterranean Identities—Environment, Society, Culture*; IntechOpen: London, UK, 2017; pp. 283–303. [CrossRef]
53. Quílez, R.; Valbuena, L.; Vendrell, J.; Uytewaal, K.; Ramirez, J. Establishing Propagation Nodes as a Basis for Preventing Large Wildfires: The Proposed Methodology. *Front. For. Glob. Chang.* **2020**, *3*, 137. [CrossRef]
54. Thornthwaite, C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.* **1948**, *38*, 55–94. [CrossRef]
55. Nesterov, V. *Forest Fires and Methods of Fire Risk Determination*; Goslesbumizdat: Moscow, Russian, 1949.
56. Käse, H. *Ein Vorschlag für eine Methode zur Bestimmung und Vorhersage der Waldbrandgefährdung mit Hilfe komplexer Kennziffern*; Akademie-Verlag: Berlin, Germany, 1969.
57. Reinhard, M.; Rebetez, M.; Schlaepfer, R. Recent climate change: Rethinking drought in the context of forest fire research in Ticino, South of Switzerland. *Theor. Appl. Climatol.* **2005**, *82*, 17–25. [CrossRef]
58. Sancho, J.L.; Moraga, R.Q. Análisis de la humedad del combustible vivo en la Comunitat Valenciana. In *Actas del 7º Congreso Forestal Español*; Sociedad Española de Ciencias Forestales: Plasencia, Spain, 2017.
59. Sardans, J.; Peñuelas, J. Plant-soil interactions in Mediterranean forest and shrublands: Impacts of climatic change. *Plant Soil* **2013**, *365*, 1–33. [CrossRef]
60. Wilson, N.; Bradstock, R.; Bedward, M. Detecting the effects of logging and wildfire on forest fuel structure using terrestrial laser scanning (TLS). *For. Ecol. Manag.* **2021**, *488*, 119037. [CrossRef]
61. Zapata, R.; Oliver-Villanueva, J.-V.; Lemus-Zúñiga, L.-G.; Fuente, D.; Pla, M.A.M.; Luzuriaga, J.E.; Esteve, J.C.M. Seasonal variations of electrical signals of *Pinus halepensis* Mill. in Mediterranean forests in dependence on climatic conditions. *Plant Signal. Behav.* **2021**, *16*, 1948744. [CrossRef] [PubMed]
62. Gale, M.G.; Cary, G.J.; Van Dijk, A.I.; Yebra, M. Forest fire fuel through the lens of remote sensing: Review of approaches, challenges and future directions in the remote sensing of biotic determinants of fire behaviour. *Remote Sens. Environ.* **2021**, *255*, 112282. [CrossRef]
63. Rothermel, R.C. *How to Predict the Spread and Intensity of Forest and Range Fires*; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station: Minneapolis, MN, USA, 1983; Volume 143.
64. Castro, F.X.; Tudela, A.; Gabriel, E.; Montserrat, D.; Canyameres, E.; Segarra, M. Evolution of live fuel moisture in Mediterranean forest. *For. Ecol. Manag.* **2006**, *234*, S34. [CrossRef]
65. Viegas, D.X.; Soares, J.; Almeida, M. Combustibility of a mixture of live and dead fuel components. *Int. J. Wildland Fire* **2013**, *22*, 992–1002. [CrossRef]
66. Schroeder, M.J.; Buck, C.C. *Fire Weather, Agricultural Handbook 360*; USDA Forest Service: Washington, DC, USA, 1970.
67. Countryman, C.M. *Measuring Moisture Content in Living Chaparral: A Field User's Manual (Vol. 36)*; U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest and Range Experiment Station: Prather, CA, USA, 1979.
68. de Luis, M.; Čufar, K.; Di Filippo, A.; Novak, K.; Papadopoulos, A.; Piovesan, G.; Rathgeber, C.B.; Saz, M.A.; Smith, K.T. Plasticity in dendroclimatic response across the distribution range of Aleppo pine (*Pinus halepensis*). *PLoS ONE* **2013**, *8*, e83550. [CrossRef]
69. AAVV. Distribution Map of Aleppo Pine. EUFORGEN 2009. 2008. Available online: www.euforgen.org (accessed on 16 July 2020).
70. Fady, B.; Semerci, H.; Vendramin, G.G. *EUFORGEN Technical Guidelines for Genetic Conservation and Use for Aleppo Pine (Pinus halepensis) and Brutia Pine (Pinus brutia)*; Bioversity International: Rome, Italy, 2003; p. 6. ISBN 92-9043-571-2.
71. Mauri, A.; Di Leo, M.; De Rigo, D.; Caudullo, G. *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Europe: Distribution, habitat, usage and threats. In *European Atlas of Forest Tree Species*; Publications Office of the EU: Luxembourg, 2016.
72. IFN3. *Tercer Inventario Forestal Nacional (3rd National Forest Inventory of Spain)*; Ministerio para la Transformación Ecológica y el Reto Demográfico: Madrid, Spain, 2007.
73. Smith, D.; Allen, S. Measurement of sap flow in plant stems. *J. Exp. Bot.* **1996**, *47*, 1833–1844. [CrossRef]
74. Park, H.J.; Park, J.H.; Park, K.S.; Ahn, T.I.; Son, J.E. Nondestructive measurement of paprika (*Capsicum annum* L.) internal electrical conductivity and its relation to environmental factors. *Hortic. Sci. Technol.* **2018**, *691*–701. [CrossRef]
75. Scarff, F.R.; Lenz, T.; Richards, A.E.; Zanne, A.E.; Wright, I.J.; Westoby, M. Effects of plant hydraulic traits on the flammability of live fine canopy fuels. *Funct. Ecol.* **2021**, *35*, 835–846. [CrossRef]
76. Hao, Z.; Li, W.; Hao, X. Variations of electric potential in the xylem of tree trunks associated with water content rhythms. *J. Exp. Bot.* **2021**, *72*, 1321–1335. [CrossRef] [PubMed]
77. Love, C.; Zhang, S.; Mershin, A. Source of sustained voltage difference between the xylem of a potted *Ficus benjamina* tree and its soil. *PLoS ONE* **2008**, *3*, e2963. [CrossRef] [PubMed]
78. Burdon-Sanderson, J.S.I. Note on the electrical phenomena which accompany irritation of the leaf of *Dionæa muscipula*. *Proc. R. Soc. Lond.* **1873**, *21*, 495–496.
79. Darwin, C. *Insectivorous Plants*; D Appleton & Company: New York, NY, USA, 1875. [CrossRef]
80. Wright, J.P.; Fisher, D.B. Measurement of the sieve tube membrane potential. *Plant Physiol.* **1981**, *67*, 845–848. [CrossRef]
81. Gibert, D.; Le Mouél, J.-L.; Lambs, L.; Nicollin, F.; Perrier, F. Sap flow and daily electric potential variations in a tree trunk. *Plant Sci.* **2006**, *171*, 572–584. [CrossRef]

82. Oyarce, P.; Gurovich, L. Electrical signals in avocado trees: Responses to light and water availability conditions. *Plant Signal. Behav.* **2010**, *5*, 34–41. [CrossRef]
83. Gil, P.M.; Gurovich, L.; Schaffer, B. The electrical response of fruit trees to soil water availability and diurnal light-dark cycles. *Plant Signal. Behav.* **2008**, *3*, 1026–1029. [CrossRef]
84. Gil, P.M.; Gurovich, L.; Schaffer, B.; García, N.; Iturriaga, R. Electrical signaling, stomatal conductance, ABA and ethylene content in avocado trees in response to root hypoxia. *Plant Signal. Behav.* **2009**, *4*, 100–108. [CrossRef] [PubMed]
85. Rios-Rojas, L.; Morales-Moraga, D.; Alcalde, J.A.; A Gurovich, L. Use of plant woody species electrical potential for irrigation scheduling. *Plant Signal. Behav.* **2015**, *10*, e976487. [CrossRef] [PubMed]
86. Fromm, J.; Lautner, S. Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant Cell Environ.* **2007**, *30*, 249–257. [CrossRef]
87. The Editors of Encyclopaedia Britannica. *Electric Power*; Encyclopædia Britannica; Encyclopædia Britannica, Inc.: Chicago, IL, USA; Available online: <https://www.britannica.com/technology/electric-power> (accessed on 31 August 2020).
88. Korol, L.; Madmony, A.; Riov, Y.; Schiller, G. *Pinus halepensis* × *Pinus brutia* subsp. *brutia* hybrids? Identification using morphological and biochemical traits. *Silvae Genet.* **1995**, *44*, 186–190.
89. Allard, G.; Berrahmouni, N.; Besacier, C.; Boglio, D.; Briens, M.; Brizay, A.; Camia, A.; Colletti, L.; Conigliaro, M.; D’Annunzio, R.; et al. *State of Mediterranean Forests 2013*; FAO: Rome, Italy, 2013.
90. Buhk, C.; Meyn, A.; Jentsch, A. The challenge of plant regeneration after fire in the Mediterranean Basin: Scientific gaps in our knowledge on plant strategies and evolution of traits. *Plant Ecol.* **2007**, *192*, 1–19. [CrossRef]
91. Heras, J.D.; Moya, D.; Vega, J.A.; Daskalidou, E.; Vallejo, V.R.; Grigoriadis, N.; Tsitsoni, T.; Baeza, J.; Valdecantos, A.; Fernández, C.; et al. Post-fire management of serotinous pine forests. In *Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests*; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2012; pp. 121–150.
92. Vallejo, M.; Arianoutsou, F.M. *Post-Fire Management and Restoration of Southern European Forests*; Moreira, F., Arianoutsou, M., Corona, P., De las Heras, J., Eds.; Managing Forest Ecosystems; Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2012; Volume 24, pp. 93–119.
93. Farjon, A. *A Handbook of the World’s Conifers*; Brill: Leiden, The Netherlands, 2010.
94. Rathgeber, C.; Nicault, A.; Guiot, J.; Keller, T.; Guibal, F.; Roche, P. Simulated responses of *Pinus halepensis* forest productivity to climatic change and CO₂ increase using a statistical model. *Glob. Planet. Chang.* **2000**, *26*, 405–421. [CrossRef]
95. Thuiller, W. BIOMOD—optimizing predictions of species distributions and projecting potential future shifts under global change. *Glob. Chang. Biol.* **2003**, *9*, 1353–1362. [CrossRef]
96. Urli, M.; Delzon, S.; Eyermann, A.; Couallier, V.; García-Valdés, R.; Zavala, M.A.; Porté, A.J. Inferring shifts in tree species distribution using asymmetric distribution curves: A case study in the Iberian mountains. *J. Veg. Sci.* **2014**, *25*, 147–159. [CrossRef]
97. Osem, Y.; Lavi, A.; Rosenfeld, A. Colonization of *Pinus halepensis* in Mediterranean habitats: Consequences of afforestation, grazing and fire. *Biol. Invasions* **2011**, *13*, 485–498. [CrossRef]
98. Zapata, R.; Oliver-Villanueva, J.-V.; Lemus-Zúñiga, L.-G.; Luzuriaga, J.E.; Pla, M.A.M.; Urchueguía, J.F. Evaluation of electrical signals in pine trees in a mediterranean forest ecosystem. *Plant Signal. Behav.* **2020**, *15*, 1795580. [CrossRef] [PubMed]
99. Hapla, F.; Saborowski, J. Planning of sample size for wood anatomical investigations. *Holz Als Roh-Und Werkst.* **1987**, *45*, 141–144. [CrossRef]
100. Oliver-Villanueva, J.V.; Becker, G. Verwendungsrelevante Holzeigenschaften der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und ihre Variabilität im Hinblick auf Alter und Standraum. *Forst Und Holz* **1993**, *48*, 387–391.
101. Hapla, F.; Oliver-Villanueva, J.V.; González-Molina, J.M. Effect of silvicultural management on wood quality and timber utilisation of Cedrus atlantica in the European Mediterranean area. *Holz Als Roh-Und Werkst.* **2000**, *58*, 1–8. [CrossRef]
102. Agencia Estatal de Meteorología (Niveles de Riesgo de Incendio del Sistema FWI AEMET) España. Available online: <https://prevencionincendiosgva.es/Meteorologia/InformesPrevisiones> (accessed on 15 December 2021).
103. Volkov, A.G.; Ranatunga, D.R.A. Plants as environmental biosensors. *Plant Signal Behav.* **2006**, *1*, 105–115. [CrossRef]
104. Cardoso, S.S.L.B.; Carrondo, J.M.; Marques, P.N.; Narciso, M.J.; Rocha, I.N.; Soares, R.A. Monitorization of the electrical signal generated by a tree. In Proceedings of the 4th Luso-Spanish Assembly on Geodesy and Geophysics, Figueira da Foz, Portugal, 3–7 February 2004.
105. Directive 1999/5/EC of the European Parliament and of the Council of 9 March 1999. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:31999L0005> (accessed on 24 June 2022).
106. Madrigal, J.; Hernando, C.; Guijarro, M. A new bench-scale methodology for evaluating the flammability of live forest fuels. *J. Fire Sci.* **2013**, *31*, 131–142. [CrossRef]
107. SALTUS. *Spot Fires: Mechanisms, Análisis and Modeling*; Technical Annex; Commission of the European Communities Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria Laboratorio del Fuego, Ministerio de Agricultura, Gobierno de España: Madrid, Spain, 1997; 20p.
108. Asociación Valenciana de Meteorología ‘Josep Peinado’ (AVAMET). Available online: <https://www.avamet.org/mx-mxo.php?id=c11m902e01> (accessed on 20 December 2021).
109. Costa-Saura, J.M.; Balaguer-Beser, Á.; Ruiz, L.A.; Pardo-Pascual, J.E.; Soriano-Sancho, J.L. Empirical Models for Spatio-Temporal Live Fuel Moisture Content Estimation in Mixed Mediterranean Vegetation Areas Using Sentinel-2 Indices and Meteorological Data. *Remote Sens.* **2021**, *13*, 3726. [CrossRef]

110. Mitsopoulos, I.D.; Dimitrakopoulos, A.P. Allometric equations for crown fuel biomass of Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) in Greece. *Int. J. Wildland Fire* **2007**, *16*, 642–647. [[CrossRef](#)]
111. Matamoros, M.R.; Merino, E.G.; Ibáñez, N.I.; Bernal, E.M. Sensibilidad y grado de adaptación de “*Pinus halepensis*” mill. a la variabilidad climática en la provincia de Zaragoza. *Cuad. Soc. Española Cienc. For.* **2008**, *26*, 137–142.
112. Puertolas, J.; Sierra, R.; Pardos, J.A. Comportamiento fisiológico de una plantación de *Pinus halepensis* y *Pinus pinea* en un antiguo terreno agrícola. In Proceedings of the IV Congreso Forestal Español, Zaragoza, Spain, 26–30 September 2005.
113. Fotelli, M.N.; Korakaki, E.; Paparrizos, S.A.; Radoglou, K.; Awada, T.; Matzarakis, A. Environmental controls on the seasonal variation in gas exchange and water balance in a near-coastal Mediterranean *Pinus halepensis* forest. *Forests* **2019**, *10*, 313. [[CrossRef](#)]
114. Sánchez-Costa, E.; Poyatos, R.; Sabaté, S. Contrasting growth and water use strategies in four co-occurring Mediterranean tree species revealed by concurrent measurements of sap flow and stem diameter variations. *Agric. For. Meteorol.* **2015**, *207*, 24–37. [[CrossRef](#)]
115. Keane, R.E. *Wildland Fuel Fundamentals and Applications*; Springer International Publishing: New York, NY, USA, 2015; ISBN 9783319090153.
116. de Dios Rinaudo, R. *Plant-Fire Interactions*, 1st ed.; Applying Ecophysiology to Wildfire Management (Managing Forest Ecosystems, 36); Springer: Cham, Switzerland, 2020; ISBN 9783030411916.
117. Alexander, M.E.; Cruz, M.G. Corrigendum to: Assessing the effect of foliar moisture on the spread rate of crown fires. *Int. J. Wildland Fire* **2013**, *22*, 869–870. [[CrossRef](#)]
118. Jenkins, M.J.; Page, W.G.; Hebertson, E.G.; Alexander, M.E. Fuels and fire behavior dynamics in bark beetle-attacked forests in Western North America and implications for fire management. *For. Ecol. Manag.* **2012**, *275*, 23–34. [[CrossRef](#)]
119. Talucci, A.C.; Krawchuk, M.A. Dead forests burning: The influence of beetle outbreaks on fire severity and legacy structure in sub-boreal forests. *Ecosphere* **2019**, *10*, e02744. [[CrossRef](#)]
120. Reiner, A.L. *Fire Behavior in Beetle-Killed Stands: A Brief Review of Literature Focusing on Early Stages after Beetle Attack*; U.S. Forest Service Pacific Southwest Region: Vallejo, CA, USA, 2017; Volume 5, pp. 1–5.
121. Martin, M.S.; Bonet, J.A.; De Aragón, J.M.; Voltas, J.; Coll, L.; De Dios, V.R. Crown bulk density and fuel moisture dynamics in *Pinus pinaster* stands are neither modified by thinning nor captured by the Forest Fire Weather Index. *Ann. For. Sci.* **2017**, *74*, 51. [[CrossRef](#)]
122. Nolan, R.H.; Hedo, J.; Arteaga, C.; Sugai, T.; de Dios, V.R. Physiological drought responses improve predictions of live fuel moisture dynamics in a Mediterranean forest. *Agric. For. Meteorol.* **2018**, *263*, 417–427. [[CrossRef](#)]
123. Klein, T.; Cohen, S.; Yakir, D. Hydraulic adjustments underlying drought resistance of *Pinus halepensis*. *Tree Physiol.* **2011**, *31*, 637–648. [[CrossRef](#)]
124. Klein, T.; Cohen, S.; Paudel, I.; Preisler, Y.; Rotenberg, E.; Yakir, D. Diurnal dynamics of water transport, storage and hydraulic conductivity in pine trees under seasonal drought. *Forest-Biogeochem. For.* **2016**, *9*, 710. [[CrossRef](#)]
125. Oliveras, I.; Martínez-Vilalta, J.; Jimenez-Ortiz, T.; Lledó, M.J.; Escarré, A.; Pinol, J. Hydraulic properties of *Pinus halepensis*, *Pinus pinea* and *Tetraclinis articulata* in a dune ecosystem of Eastern Spain. *Plant Ecol.* **2003**, *169*, 131–141. [[CrossRef](#)]
126. Pacheco, A.; Camarero, J.J.; Ribas, M.; Gazol, A.; Gutierrez, E.; Carrer, M. Disentangling the climate-driven bimodal growth pattern in coastal and continental Mediterranean pine stands. *Sci. Total Environ.* **2018**, *615*, 1518–1526. [[CrossRef](#)]
127. Prislan, P.; Gričar, J.; de Luis, M.; Novak, K.; del Castillo, E.M.; Schmitt, U.; Koch, G.; Štrus, J.; Mrak, P.; Žnidarič, M.T.; et al. Annual cambial rhythm in *Pinus halepensis* and *Pinus sylvestris* as indicator for climate adaptation. *Front. Plant Sci.* **2016**, *7*, 1923. [[CrossRef](#)]
128. Schiller, G.; Cohen, Y. Water regime of a pine forest under a Mediterranean climate. *Agric. For. Meteorol.* **1995**, *74*, 181–193. [[CrossRef](#)]
129. Rossa, C.G. A generic fuel moisture content attenuation factor for fire spread rate empirical models. *For. Syst.* **2018**, *27*, e009. [[CrossRef](#)]
130. Moraga, R.Q.; Cisneros, J.R.; Relea, M.L. Prevención de Megaincendios Forestales Mediante el Diseño de Planes de Operaciones de Extinción Basados en Nodos de Propagación. Ph.D. Dissertation, Universidad de León, León, Spain, 2016.
131. Qi, Y.; Dennison, P.E.; Jolly, W.M.; Kropp, R.C.; Brewer, S.C. Spectroscopic analysis of seasonal changes in live fuel moisture content and leaf dry mass. *Remote Sens. Environ.* **2014**, *150*, 198–206. [[CrossRef](#)]
132. Balaguer-Romano, R.; Díaz-Sierra, R.; Madrigal, J.; Voltas, J.; Resco de Dios, V. Needle senescence affects fire behavior in Aleppo pine (*Pinus halepensis* Mill.) stands: A simulation study. *Forests* **2020**, *11*, 1054. [[CrossRef](#)]
133. Mukaka, M.M. A guide to appropriate use of correlation coefficient in medical research. *Malawi Med. J.* **2012**, *24*, 69–71.

