



2022
Lleida

27·1
junio · juny
julio · juliol

Cataluña
Catalunya

8º CONGRESO FORESTAL ESPAÑOL

La **Ciencia forestal** y su contribución a los **Objetivos de Desarrollo Sostenible**

8CFE

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales

Cataluña | Catalunya · 27 junio | juny - 1 julio | juliol 2022

ISBN 978-84-941695-6-4

© Sociedad Española de Ciencias Forestales

Organiza



Evaluación de factores influyentes sobre las señales eléctricas en *Pinus halepensis*

ZAPATA, R.¹, OLIVER-VILLANUEVA, J.V.¹, LEMUS-ZÚÑIGA, L.G.¹, LUZURIAGA, J.¹, MATEO PLA, M.A.¹, Y URCHUEGUÍA, J.F.¹

¹ Universitat Politècnica de València.

Resumen

Se conoce que los árboles generan señales eléctricas como respuestas a estímulos ambientales, pero apenas se ha estudiado o cuantificado esta actividad bioeléctrica en condiciones naturales. A fin de aumentar los conocimientos sobre dicha actividad, esta investigación tiene como objetivo principal analizar las señales bioeléctricas sobre una población de *Pinus halepensis* dentro de un ecosistema forestal mediterráneo para poder explorar su uso como parámetros indicadores que permitan monitorear de su hábitat y respuesta frente a cambios generados por el calentamiento global como sequías, incendios o plagas. Para ello, se evalúan algunos de los factores estáticos más significativos que influyen en el patrón de distribución de las señales eléctricas como son la edad del árbol, el tipo de medición y la colocación de electrodos. Tras el análisis estadístico de los resultados obtenidos, se puede concluir que la madurez del árbol influye directamente en la amplitud de la señal eléctrica y que son los pinos más jóvenes los que producen las señales eléctricas con valores máximos, siendo los patrones de distribución de los componentes de las señales eléctricas uniformes en el árbol, con independencia de la ubicación de los electrodos.

Palabras clave

Electrofisiología vegetal, señales bioeléctricas, potencial eléctrico natural, manejo forestal adaptativo, pinos mediterráneos.

1. Introducción

Las plantas tienen actividad eléctrica; este hecho fue revelado por primera vez por Burdon-Sanderson [BURDON-SANDERSON, J. S. (1873).] y Darwin [DARWIN, C. (1875).] al observar plantas insectívoras. Bosc [BOSE, J. C. (2011).] y luego Pickard [PICKARD, B. G. (1973).] evidenciaron la existencia de potenciales de acción en algunas plantas, independientemente de la presencia de movimientos foliares rápidos. En cuanto a los árboles, Wright & Fisher [WRIGHT, J. P., & FISHER, D. B. (1981).] detectaron la existencia de una diferencia en el potencial eléctrico continuo entre los electrodos insertados en el floema del árbol y el suelo circundante. Desarrollándose hipótesis tanto físicas como biológicas para explicar el origen de las señales eléctricas medidas en plantas que han sido documentadas científicamente.

Por un lado, la hipótesis biológica establece que diferentes partes de las plantas desarrollan en su evolución un sistema interno de comunicación [OYARCE, P., & GUROVICH, L. (2010).]. La transmisión de señales eléctricas a nivel celular activa respuestas fisiológicas a estímulos ambientales externos [OYARCE, P., & GUROVICH, L. (2010).]. En este contexto, diversos estudios han reportado el efecto de diferentes estímulos, tales como condiciones de luz [DATTA, P., & PALIT, P. (2004)., GUROVICH, L. A., & HERMOSILLA, P. (2009).], variaciones de temperatura [RHODES, J. et al (1996), VOLKOV, A. G., et al (2007), PYATYGIN, S. S., et al. (2008).] y heridas mecánicas [OYARCE, P., & GUROVICH, L. (2010), SCHALLER, A., & OECKING, C. (1999).]. Según algunos autores [FROMM, J., & LAUTNER, S. (2007)., OYARCE, P., & GUROVICH, L. (2010)., GELLI, A., et al (1997). MWESIGWA, J., et al (2000).] la variación de las señales eléctricas depende de la intensidad de la estimulación que podría estar asociada a cambios en la tensión del agua o

concentraciones de iones, creando un desequilibrio electroquímico transitorio. Estas señales eléctricas se transmitirían a través de las células vivas de 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 requiere un modelo matemático de la actividad eléctrica en los organismos vegetales. Pudiendo encontrarse una revisión de dichos modelos en Sukhova [SUKHOVA, E., 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 por transpiración [LOVE, C. et. al (2008)., FROMM, J., & LAUTNER, S. (2007).]. 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, C. et. al (2008).]. Diferentes autores han desarrollado diversos experimentos para apoyar esta hipótesis, por ejemplo, el floema [FROMM, J., & LAUTNER, S. (2007).], el xilema y las hojas [LOVE, C. et. al (2008).], así como otros elementos del árbol y el suelo adyacente [GORA, E. M., & YANOVIK, S. P. (2015).]. Otra teoría física se basa en el hecho de que la corriente eléctrica es el resultado de un fenómeno electrocinético, que es causado por el movimiento de líquidos en un medio poroso [HORWITZ, W. (1939)., GIBERT, D., et. al (2006).]. Para componer los modelos físicos detrás de este potencial, es necesario realizar los experimentos bajo las condiciones controladas de un laboratorio. Adicionalmente, se han realizado varios trabajos con especies agrícolas en condiciones de laboratorio [OYARCE, P., & GUROVICH, L. (2010).,31-33]. También debemos tener en cuenta que algunos de estos estudios se limitan únicamente a analizar únicamente los datos de voltaje [GIBERT, D., et. al (2006), CARDOSO, S.S., et. al (2004).].

Todos estos requisitos dificultan la realización de investigaciones sobre árboles en los bosques, lo que podría explicar el reducido número de publicaciones encontradas. Por ejemplo, los estudios que [LOVE, C. J., et. al (2008), GORA, E. M., & YANOVIK, S. P. (2015), KOPPÁN, A. (2002), LE MOUËL, J. L., et. al (2010)] observaron señales eléctricas en árboles individuales, no permiten analizar la variabilidad entre individuos en un ecosistema. Además, las pocas investigaciones que hemos podido documentar se han llevado a cabo principalmente en zonas climáticas de Europa central y continental, p. Ej. *Aesculus hippocastanum* [MORAT, P., et. al (1994).] y *Populus nigra* [GIBERT, D., et. al (2006).] ambos en Francia, [MORAT, P., et. al (1994).], *Salix alba* en Austria [GINDL, W., et. al (1999).], *Quercus spp.* Y *Fagus sylvatica* [KOPPÁN, A., SZARKA, L., & WESZTERGOM, V. (1999). KOPPAN, A. (2004).].

En consecuencia, no se han encontrado análisis rigurosos de señales eléctricas relacionadas con especies de coníferas ni ecosistemas mediterráneos. Por estas razones, tenemos como meta, suplir esta falta de conocimiento. Centrándose en la caracterización y análisis de las señales eléctricas en condiciones naturales (fuera del laboratorio) explorando el comportamiento de los dos componentes de las señales eléctricas (tensión y corriente de cortocircuito (ISC)) en una población representativa de pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) En la zona mediterránea.

Una adecuada aplicación la monitorización de las señales eléctricas es la utilización de las propias plantas como biosensores. Esta idea ha sido estudiada por otros autores en laboratorios de investigación en condiciones controladas [GIL, P. M., et. al (2008). GIL, P. M., et. al (2009). RÍOS-ROJAS, L., et. al (2015). VOLKOV, A. G., & RANATUNGA, D. R. A. (2006).]. Pero para utilizar árboles en el bosque salvaje como biosensores, tenemos que enfrentar el problema de la falta de información sobre señales eléctricas en condiciones naturales incontroladas. Así, consideramos necesario crear una buena base de investigación sobre el comportamiento de esas señales eléctricas de los árboles, tanto estática como dinámicamente.

2. Objetivos

En el presente trabajo, hemos evaluado los factores estáticos más significativos que influyen en la señal eléctrica que se registran en los *Pinus halepensis*, en condiciones naturales. Estudiando la distribución que presenta el voltaje y la intensidad de cortocircuito (ISC), bajo la influencia específica de:

- la edad del árbol.
- la ubicación de los electrodos (altura y orientación de la asignación).
- la configuración de medición (bipolar o referenciada a configuraciones de tierra).

3. Metodología

A continuación, describimos el principal material y métodos utilizados en este estudio, que se llevó a cabo en condiciones naturales sobre un grupo de pinos representativos pertenecientes a un bosque mediterráneo.

3.1 Selección de la muestra

Las especies de coníferas son muy representativas de la zona mediterránea, y una de las más importantes es el pino carrasco (*Pinus halepensis* Mill.) [AAVV. (2008). FADI, B., et. al (2003)]. Para la realización de este estudio, se evaluaron una serie de bosques potenciales, utilizando las capas del Sistema de Información Geográfica (SIG) del Inventario Nacional de Bosques de España [IFN3 (2007)]. Se buscaron rodales maduros y puros de *Pinus halepensis* en el este de España. Debido al diferente comportamiento fisiológico de los árboles según la edad [7,41], incluimos la edad del árbol como una variable crítica en el diseño de la investigación y en la selección de los rodales muestrales. Por lo tanto, para seleccionar un bosque apropiado para la realización de este trabajo, se consideraron las siguientes características:

- A. Una población arbórea de la misma especie (rodales puros),
- B. Suficientes ejemplares para cada grupo de edad,
- C. Un área no afectada (al menos en los últimos años) por perturbaciones ambientales sustanciales (incendios forestales, plagas o daños por nieve).

Cruzando todas las capas de SIG con estas consideraciones se encontró una muestra apropiada de bosque dentro del Parque Natural Sierra Calderona. Área ubicada en el interior de la provincia de Valencia, España. El área elegida, cuenta con aproximadamente 20 hectáreas, con rodales puros de pino carrasco. Los árboles muestran claramente que pertenecen a dos clases de edad diferentes, ubicadas físicamente muy cerca una de la otra. Estos árboles mantienen las mismas condiciones edafológicas, así como régimen de insolación, orientación y disponibilidad de agua. Las dos clases de edad son:

- A. Árboles jóvenes: rodales regenerados naturalmente de unos 26 años. Los cuales se originaron después de un incendio forestal en 1994 [MOLINER, J. I. U. (2004)].
- B. Árboles maduros: rodales puros de edad uniforme, repoblados hace unos 50 años y sobrevivieron al incendio forestal de 1994.

El rodal de muestra seleccionado tiene un tamaño aproximado de 0.25 hectáreas y está ubicado en la latitud 39° 45 '28.80 "N y longitud 0° 30' 36.36" W. La Figura 1 muestra la naturaleza del área de estudio.



Figura 1. Fotografía del área de estudio.

3.2 Selección de árboles representativos

En el rodal de muestra seleccionado, se inventariaron un total de 121 árboles. De los cuales se midieron los principales parámetros dendrométricos, es decir, el diámetro a la altura del pecho (DAP a 1,3 m) [SAKET, M., et. al (2004).] y la altura total del árbol (ht). Los resultados de este inventario se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros dendrométricos de la población del árbol: diámetro altura pecho (DAP) y altura total del árbol (ht).

	Diámetro Altura Pecho DAP [cm]	Altura Total De Árbol ht [m]
Media	12.10	5.16
Mediana	11.10	5.13
Maximo	25.10	9.69
Mínimo	6.4	2.77
Desviación Estándar	3.95	1.30
Varianza	15.59	1.68
Numero De Arboles	121	

Siguiendo las recomendaciones de Fernández-Puratich [PURATICH, F., & WILSON, H. (2013).], Oliver-Villanueva [OLIVER-VILLANUEVA, J. V., & BECKER, G. (1993).] y Hapla [HAPLA, F., OLIVER-VILLANUEVA, J. V., & GONZÁLEZ-MOLINA, J. M. (2000).], se descartaron para el estudio aquellos árboles que: i) se encontraban ubicados en el borde de la parcela, ii) hubieran crecido excesivamente mal formados o iii) mostraran afecciones de hongos o insectos. Además, siguiendo las recomendaciones de Ríos-Rojas [RÍOS-ROJAS, L., et. al (2015).], para una primera fase del estudio, seleccionamos diferentes muestras estándar al azar: dos árboles maduros, dos árboles jóvenes y un árbol muerto en pie. Esta primera fase se centró en las mediciones de voltaje y corriente en función de la edad del árbol.

En la segunda fase del estudio, realizamos un estudio estadístico para determinar el tamaño de la población siguiendo la metodología descrita por Hapla & Saborowski [HAPLA, F., & SABOROWSKI, J. (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, un número creciente de muestras no mejora significativamente los resultados. Por ello, para esta fase, nuestra población arbórea se redujo a 15 árboles

representativos, alcanzando un intervalo de confianza del 95%, considerando los criterios de selección utilizados en diferentes estudios relacionados con las características de la madera y propiedades físicas de varias especies arbóreas [OLIVER-VILLANUEVA, J. V., & BECKER, G. (1993), SEELING, U., & SACHSSE, H. (1991), SAUTER, U. (1992), WOBST, J. (1995), PETERS, S. (1996)]. Los árboles seleccionados cumplen las siguientes características:

1. La altura y el diámetro no difieren más que una desviación estándar de los valores medios.
2. Pertenecen a la clase sociológica I (árboles dominantes) o clase II (árboles codominantes) de KRAFT.
3. Sin daño o enfermedad significativa o apreciable presente en el tronco.
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).

3.3 Equipo de medición

Los parámetros eléctricos se midieron con el equipo UT71D UNI-T, el cual cuenta con una impedancia de entrada de 2,5 G Ω y una precisión de 0,1% \pm 2 milivoltios (mV), como se utiliza en otros estudios [KRCMAR, P., et al (2019), WANG, K., & ZHANG, S. (2019)].

Para su inserción en los árboles utilizamos electrodos extracelulares de acero inoxidable como en trabajos anteriores [GIBERT, D., 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 fueran fabricados con el mismo material.

Elegimos tornillos como electrodos porque se pueden insertar y extraer fácilmente de los árboles, causando la más mínima lesión posible. Además, debido a su rosca, los tornillos tienen una superficie de contacto mayor que los electrodos lisos.

Para las mediciones referenciadas a tierra como conexión a tierra del circuito, utilizamos un electrodo de aleación de platino-iridio recubierto de nitruro de titanio (1999/5 / EC). Se utilizaron electrodos no polarizados como tierra para minimizar los resultados falsos inducidos por las cargas que se cruzan libremente entre la interfaz electrodo-electrolito siguiendo las experiencias de Prutchi [PRUTCHI, D., & NORRIS, M. (2004)]. Cada electrodo se conectó con el equipo de medición a través de un conector eléctrico y un cable conductor de cobre de 0,5 mm aislado con un revestimiento de plástico flexible (CE 0123). La Figura 2 muestra los electrodos de tierra utilizados.



Figura 2. Electrodo de tierra.

3.4 Colocación y medición de los electrodos

Para registrar el voltaje y la corriente de cortocircuito (ISC) en los árboles seleccionados, se insertaron los electrodos directamente en el tronco en contacto con el tejido floemático. Esto se aseguró insertando los electrodos mediante una llave dinamométrica que nos permitió detectar el cambio de dureza. Según algunos autores, el floema [OYARCE, P., & GUROVICH, L. (2010).] juega un papel activo en la respuesta eléctrica de los árboles. Oyarce [OYARCE, P., & GUROVICH, L. (2010).] demostró que las células vivas que componen estas áreas ofrecen menor resistencia al flujo de corriente en comparación con el resto de los tejidos de la planta.

Los electrodos se colocaron siguiendo una distribución circular y otra longitudinal para determinar la distribución de las señales eléctricas en todas las dimensiones del tronco de cada árbol.

En la configuración de anillo circular, los electrodos se colocaron a 1,5 m sobre el suelo en los cuatro puntos cardinales (norte, este, sur y oeste). Usando la brújula para la correcta orientación de las caras de los árboles donde se insertaron los electrodos, como se muestra en la Figura 3 (izquierda). En la configuración longitudinal, los electrodos se insertaron en el tronco cada 50 cm, siguiendo una línea en la cara norte, a lo largo del tronco. La Figura 3 (derecha) muestra esta configuración.



Figura 3: Colocación de electrodos usando una brújula (izquierda), identificación de árboles y ubicación radial de los electrodos(derecha)

El electrodo de referencia a tierra se enterró 15 cm en el suelo, a un mínimo de 3 m de distancia del árbol. La colocación de los electrodos utilizada fue la misma en modo bipolar o referenciada a tierra, cambiando solo la conexión de los electrodos. Así, se realizaron mediciones referenciadas a tierra entre cada uno de los electrodos en relación con la tierra. Por otro lado, se realizaron medidas bipolares, entre dos electrodos cercanos, se realizó con una separación fija de 0,5 m. entre ellos. El primer nivel fue desde el electrodo ubicado a cero metros hasta 0.5 m.,

el siguiente nivel fue desde 0.5 m. a 1 m., continuando así, hasta tres metros de altura en el árbol. La Figura 4 muestra un diagrama de esta configuración.

La configuración utilizada por los electrodos para medir la diferencia de potencial fue la misma para la población total de árboles. Entre el 18 y el 19 de noviembre de 2017 se realizaron mediciones continuas durante 24 h, muestreando datos cada hora. En esta sesión de medición, no pretendíamos observar una diferencia de comportamiento en función del tiempo, únicamente se registraron las diferencias de valores de voltaje entre los dos grupos de edad.

Una vez obtenidos los resultados de la fase preliminar del estudio, se seleccionaron los árboles que formaron la población para la segunda fase, en base a los resultados observados. Se comenzó a medir el voltaje y la intensidad en los 15 árboles seleccionados que componían esta población representativa, analizando la distribución de la señal eléctrica en los árboles.



Figura 3. Modos de configuración de colocación de electrodos: (izquierda) mediciones referenciadas a el suelo, (derecha) configuración bipolar. [65].

3.5 Condiciones experimentales

El registro de los datos de las señales eléctricas se realizó mediante mediciones a través de 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.

En primer lugar, dado que causamos una pequeña lesión en los troncos al insertar los electrodos y los árboles tienden a responder formando barreras de compartimentación para prevenir infecciones y resistir la propagación de la descomposición de la madera [WOODWARD, S., & PEARCE, R. B. (1988).]. En los árboles generalmente, dentro de los 24 días posteriores a la creación de la herida, aparece un límite impermeable de aproximadamente 1 mm dentro de la superficie de la herida [WOODWARD, S., & PEARCE, R. B. (1988), MULLICK, D. B. (1975).]. En las coníferas, la impermeabilidad surge entre 28 y 30 días después de la lesión en estos árboles [WOODWARD, S., & PEARCE, R. B. (1988).]. Por este motivo la realización de las primeras mediciones se comenzó después de dejar suficiente tiempo para la generación de la zona límite (peridermo necrofiláctico) en el árbol.

En segundo lugar, tenemos que abordar el hecho de que las condiciones ambientales afectan el comportamiento de la planta y generan cambios en el potencial eléctrico [LE MOUËL, et. al (2010). RÍOS-ROJAS, L., et. al (2015). FENSOM, D. S. (1963). ABBOTT, D. T., & CROSSLEY JR, D. A. (1982).]. En este trabajo para evitar que factores externos incontrolables pudieran influir en nuestras observaciones estáticas, realizamos las mediciones en días con similar humedad y temperatura del aire, principalmente en días luminosos sin nubes. Todas las

mediciones se realizaron en la hora del cenit (entre las 13:30 y las 14:00 CET). La decisión de realizar las mediciones en este periodo de tiempo se basó en la mayor incidencia solar, la menor presencia de nubes y las condiciones estables.

3.6 Análisis estadísticos

Se analizaron, mediante el empleo del programa informático Matlab, cada uno de los datos recopilados de voltajes e ISC, realizando pruebas de distribución normal, homocedasticidad de varianza y ANOVA. En nuestro caso, para comprobar si los datos siguen una distribución normal se aplicó la prueba paramétrica t-Student. Esto permite evaluar la comparación entre las dos edades del árbol, así como entre bipolar y referenciado a los datos de configuración del electrodo de tierra (para dos muestras). El concepto de homocedasticidad de datos implica constancia en la varianza de los errores y se utiliza para garantizar la predicción de una variable mediante el cálculo del valor promedio de su conjunto [ABBOTT, D. T., & CROSSLEY JR, D. A. (1982).]. Se realizó un análisis de la varianza (ANOVA) con datos de orientación norte, este, sur y oeste (N, E, S, W) (para tres o más muestras). Además, se aplicó la prueba de Kruskal-Wallis y la prueba U de Mann-Whitney para comprobar la heterogeneidad de los datos para dos y tres muestras, respectivamente.

4. Resultados

4.1 Influencia de la edad de los árboles

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos en la comparación entre árboles jóvenes y maduros. Además, en esta tabla también se muestra la existencia de una influencia apreciable de la edad de los árboles en las señales eléctricas referenciadas a tierra. Estadísticamente se ha podido demostrar que existe una diferencia significativa entre los grupos de edad (valor $p < 0,0001$) con un voltaje promedio de 0,929 V en árboles jóvenes y 0,238 V en árboles maduros. Por otro lado, las medidas bipolares muestran un voltaje promedio de 0.010 V y 0.014 V para árboles jóvenes y maduros, respectivamente. En las mediciones bipolares, la diferencia de edad no muestra diferencias significativas entre grupos (valor de $p = 0,45$).

En la Figura 5 se muestran los principales resultados obtenidos en 24 horas de referencia a las mediciones referenciadas a tierra. El voltaje promedio en árboles jóvenes es 0.383V con un valor máximo de 0.626V. Los árboles maduros muestran valores significativamente más bajos que los árboles jóvenes (valor $p < 0,0001$) con un voltaje promedio de 0.150 V y un valor máximo de 0.295 V. El árbol muerto utilizado como control, muestra valores de 0 V, como se esperaba.

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

Medición	Grupo	Máx	Min	Media	Desv.
Mediciones 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 Mediciones Referenciadas a Tierra 24h	Joven	-0.223	-0.626	-0.383	0.100
	Maduro	-0.012	-0.295	-0.150	0.073

4.2 Influencia de la altura

Para el análisis de la variación longitudinal de las señales eléctricas, solo se han seleccionado los árboles jóvenes, ya que muestran valores significativamente superiores en las medidas de voltaje frente a los árboles más viejos.

4.2.1 Medidas referenciadas a tierra.

La Figura 6 y la Tabla 3 muestran valores muy constantes en todos los niveles de altura. Con un valor de tensión máximo de 0,626 V medido a nivel del suelo y un valor mínimo de 0,597 V a 2,5 m. Los ISC muestran valores aún más cercanos entre sí que el voltaje, con un valor máximo de ISC de 0.568 μ A a 0 m y un valor mínimo de 0.519 μ A medido a 2.5 m.

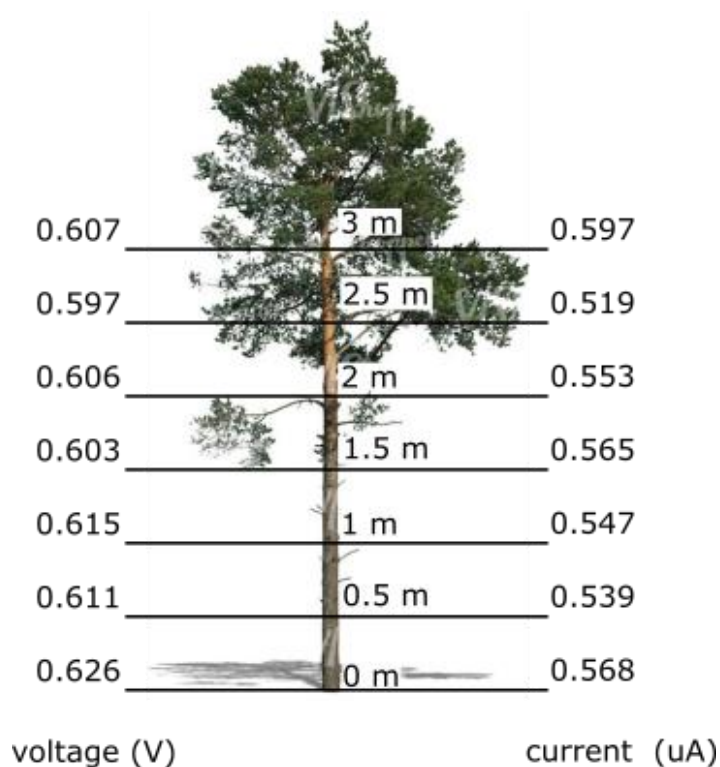


Figura 4. Mediciones referenciadas a tierra para voltaje y corriente teniendo en cuenta la altura en el árbol.

Analizando los datos obtenidos, no encontramos diferencias significativas ni en voltaje (p -valor = 0,86) ni en ISC (p -valor = 0,91) entre los diferentes niveles de altura. Por lo tanto, la altura de medición no muestra influencia sobre el voltaje o ISC referenciado a las mediciones de tierra.

Tabla 3. Media estadística y varianza de las mediciones referenciadas a tierra, para voltaje y corriente teniendo para cada nivel de altura en el árbol.

Altura (m)	Voltaje (V)		ISC (μ A)	
	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

4.2.2 Medidas bipolares

Tanto el voltaje como el ISC muestran valores muy cercanos entre cada nivel de altura para las mediciones bipolares. Los valores más altos para la media de tensión se han obtenido entre 1 m. a 1,5 m. sobre el suelo (0,036 V) y los valores mínimos entre 2,5-3,0 m. (0,025 V). Por otro lado, los valores máximos de ISC se midieron entre 0,0 m a 0,5 m (0,471 μ A) y los valores mínimos entre 2,0-2,5 m. (0,218 μ A).

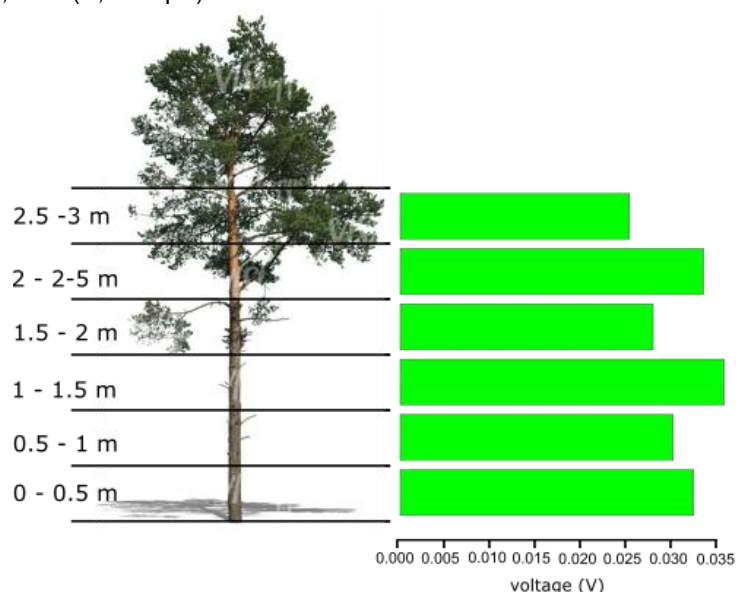


Figura 5. Mediciones de voltaje bipolar teniendo en cuenta la altura en el árbol.

Sin embargo, pese a las leves diferencias observadas, estas no son significativas entre los niveles de altura, ni para voltaje (valor $p = 0,517$) ni para ISC (valor $p = 0,248$).

Tabla 4. Media y varianza de las mediciones de voltaje bipolar teniendo en cuenta la altura en el árbol.

Altura (m)	Voltaje (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 Influencia de la orientación

Los resultados mostraron valores muy similares, no pudiendo encontrar diferencias significativas entre la ubicación de los puntos cardinales de los electrodos (valor $p = 0,871$), como se puede observar en la Figura 8. Sin embargo, es necesario señalar que se detectó una pequeña diferencia significativa para ISC entre el electrodo situado en el Este y los otros puntos cardinales (valor $p = 0,048$). Se decidió continuar con la obtención de datos con el fin de analizar con más detalle la posible influencia de la orientación en el ISC. Así, se realizaron otras dos mediciones los días 5 de abril y 12 de mayo de 2018. Ninguna de ellas mostró diferencias estadísticamente significativas, ni para tensión ni para ISC, como se puede apreciar en la Tabla 5. En consecuencia, estas mediciones adicionales descartaron una posible influencia de orientación sobre voltaje e ISC.

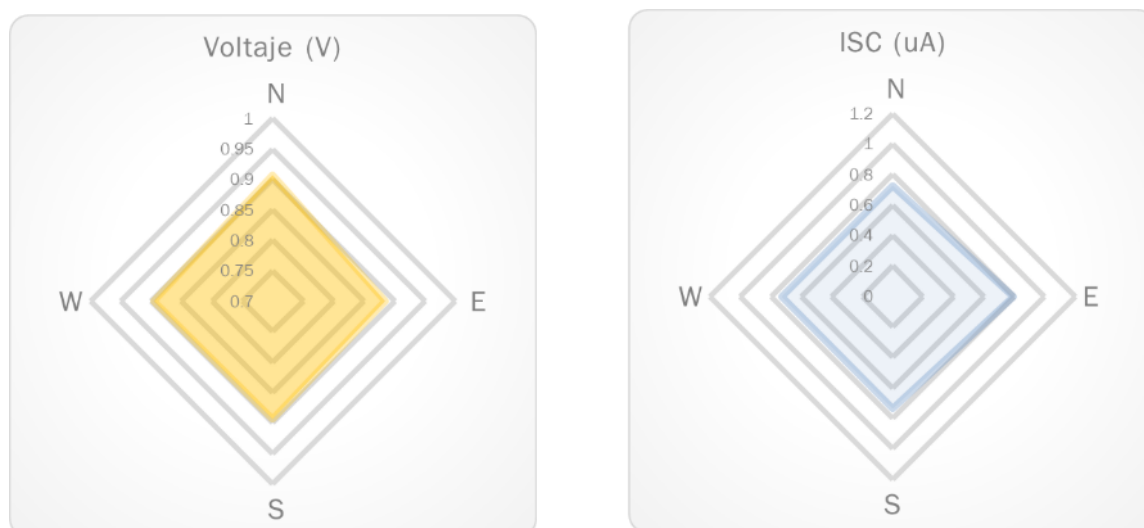


Figura 6. Media del Voltaje y de la ISC en función de la orientación.

Tabla 5. Media y varianza de las mediciones de tensión referenciadas al suelo teniendo en cuenta la orientación en el árbol.

	Voltaje (V)				ISC (μ A)			
	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

4.4 Configuración óptima de electrodos

Los resultados confirman diferencias significativas (valor $p < 0,001$) en los datos obtenidos según la configuración de los electrodos, ya sea referenciados a tierra o bipolar. La Figura 9 muestra este resultado gráficamente. Además, los resultados obtenidos, demuestran que los valores de voltaje medidos muestran una clara y significativa diferencia entre las configuraciones de los electrodos, con un valor promedio de 0.626 V para las medidas referenciadas a tierra y un valor de 0.036 V para las medidas bipolares. Por otro lado, los valores observados para ISC muestran diferencias menores que las detectadas para el voltaje (ver Figura 9), las medias de intensidad muestran un promedio de 0,597 μA para la medida referenciada a tierra y 0,471 μA para la medida bipolar. Estas diferencias registradas son estadísticamente significativas ($p < 0,001$).

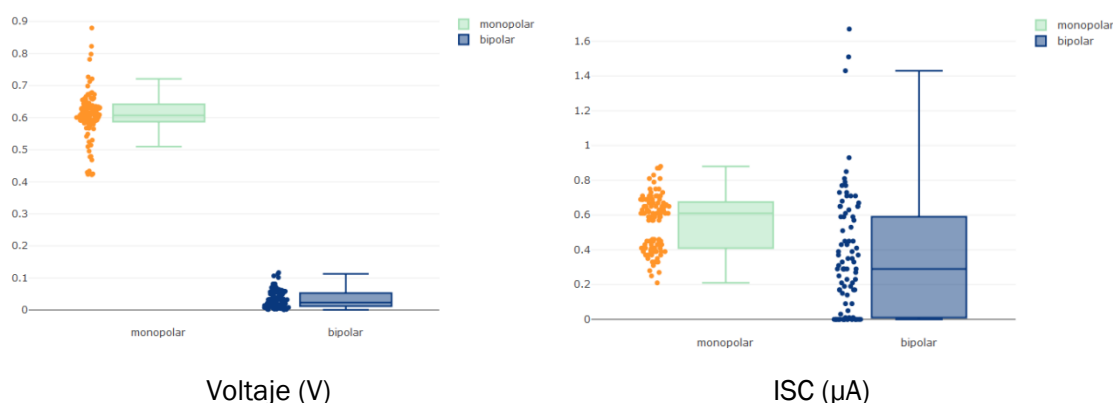


Figura 7. Diferencia significativa entre las medidas de configuración bipolar y las referenciadas a tierra, en términos de voltaje (izquierda) y de ISC(derecha) ($p\text{-value} < 0.0001$).[65].

5. Discusión

En este trabajo, el primer resultado a considerar es la observación de una diferencia de potencial eléctrico negativa del árbol con respecto al suelo. Esta observación es consistente con los diferentes autores que han estudiado el voltaje en varias especies de árboles [GORA, E. M., & YANOVIK, S. P. (2015). GIBERT, D., et.al. (2006). OYARCE, P., & GUROVICH, L. (2010). KOPPAN, A. (2004).]. En cuanto a la dirección del ISC, Le Mouél [LE MOUËL, J. L., et. al. (2010).] concluye sobre la presencia de islas cargadas positivamente que producen una inversión del flujo de corriente. Durante el trabajo de campo para esta investigación, no hemos podido observar ninguna inversión de la dirección actual. Sin embargo, como se menciona en la sección de materiales y métodos, los diferentes conjuntos de medidas se realizaron en condiciones meteorológicas lo más similares posible.

Igualmente, los resultados indican que la edad en los *Pinus halepensis* del mediterráneo tiene una influencia directa en la diferencia de potencial eléctrico medible, ya que los pinos jóvenes presentan una tensión significativamente mayor que los árboles maduros (0,92 V y 0,24 V respectivamente). Además de la investigación de laboratorio o vivero [OYARCE, P., & GUROVICH,

L. (2010). GIL, P. M., et. al (2008). GIL, P. M., et. al (2009). RÍOS-ROJAS, L., et. al (2015).], existen trabajos de investigación que se realizaron con árboles en el medio natural, pero esas actividades se realizaron con un solo árbol ya maduro. Así, por ejemplo, Cardoso [CARDOSO, S.S., et. al. (2004).] analiza las señales eléctricas de un eucalipto (*Eucalyptus globulus*) con una altura de 15 m y un diámetro a la altura del pecho de 45 cm. Aunque en dicho trabajo no se menciona la edad del árbol, asumimos que se trata de un árbol maduro. Lo mismo ocurre en otros trabajos de otros autores. [GIBERT, D., et. al. (2006). MORAT, P., et. al. (1994), GINDL, W., et. al. (1999). KOPPAN, A. (2004).]. Adicionalmente, al comparar los valores de voltaje obtenidos por estos autores con los nuestros, se acercan 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 [SELLIN, A. (1991).] observa que el espesor de la albura, en el que se concentra la actividad fisiológica, disminuye su proporción relativa cuando los árboles envejecen. Asimismo, Rosensvald [ROSENSVALD, K., 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 aumento volumétrico de *Pinus halepensis* desarrolladas y publicadas por Montero [MONTERO, G., et. al. (2002).].

Además, los resultados indican que tanto las mediciones de voltaje como las de ISC muestran patrones de distribución uniforme en los árboles. En consecuencia, la medida no varía según la altura o la posición de orientación del electrodo en el tronco. Le Mouel [LE MOUËL, J. L., GIBERT, D., & POIRIER, J. P. (2010).] muestra una ligera tendencia a incrementar los valores de voltaje al aumentar la altura de posicionamiento de los electrodos en el tronco. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que esta investigación solo se realizó en un solo árbol. Nuestra investigación no puede verificar este presunto aumento ni con las mediciones bipolares ni con las mediciones referenciadas a tierra.

De igual forma que nosotros hemos podido demostrar, Gibert [GIBERT, D., et. al. (2006).] y Love [LOVE, C. J., et. al. (2008).] no observan diferencias significativas entre la medida de voltaje a diferentes alturas dentro del árbol respecto a tierra. Así mismo, los valores medios de tensión obtenidos en nuestras mediciones están en el mismo orden de magnitud que los de la literatura consultada [LOVE, C. J., et. al. (2008). GIBERT, D., et. al. (2006).], a pesar de que estos autores realizaron su trabajo fuera y dentro de un laboratorio, respectivamente. De acuerdo con Gibert [GIBERT, D., et. al. (2006).], podemos descartar la teoría electrocinética como generadora de la diferencia de la señal eléctrica en árboles. Según la teoría electrocinética, el campo eléctrico sería proporcional al gradiente de presión [DELGADO, Á. V., et. al. (2007).], que, transferido a una planta, sería el flujo de savia por unidad de superficie. Por tanto, esta teoría implicaría un incremento lineal de la amplitud del potencial eléctrico con la altura en el tronco, al menos en promedio.

En el caso de la señal eléctrica registrada en función de la orientación, nuestros resultados también coinciden con las observaciones de voltaje realizadas por otros autores [LOVE, C. J., et. al. (2008). KOPPAN, A. (2004).], en mediciones en árboles individuales. Los valores de ISC se presentan en un solo trabajo [LOVE, C. J., et. al. (2008).], los valores de ISC que se muestran en dicho trabajo son relativamente similares a nuestros valores registrados. Sin embargo, no se menciona la distribución del ISC, pero dado que la distribución de voltaje es homogénea, no tenemos argumentos en contra de la hipótesis de que la distribución de ISC debería comportarse de manera diferente.

6. Conclusiones

En conclusión, la corriente eléctrica y el voltaje no varían en función de la altura de medición o la orientación del electrodo, lo que reduce la dificultad del trabajo de campo para recolectar datos, ampliando las posibilidades de instalación de equipos de medición. Además, el uso de árboles jóvenes en mediciones con referencia al suelo brinda la posibilidad de trabajar con señales eléctricas de mayor valor. Todo esto nos permitirá optimizar la colocación de los electrodos de medida en los árboles según las circunstancias. Y también nos permite consolidar el conocimiento de cómo los factores estáticos influyen en la medición de señales eléctricas.

En consecuencia, esto nos brinda la oportunidad de continuar investigando el comportamiento dinámico de las señales eléctricas en una población de *Pinus halepensis* en un ecosistema mediterráneo. Tenemos previsto evaluar la influencia de otros factores como las variaciones del ciclo de los árboles (diario, mensual y anual) o incluso las distintas variables meteorológicas características del clima mediterráneo.

Trabajamos con el objetivo de sentar una base para el uso de señales eléctricas medibles en los árboles como un medio para indicar el estado de los árboles individuales y la masa forestal. Información que podría integrarse con otras tecnologías de detección que permitirá una toma de decisiones más precisa y correcta en la planificación y manejo forestal a través del monitoreo constante de árboles.

7. Bibliografía

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.

DARWIN, C. (1875). *Insectivorous plants.*(D Appleton & Company: New York). doi:10.5962/bhl.title.99933

BOSE, J. C. (2011). *Nervous mechanism of plants.* Longmans, Green and Co., Calcutta. doi:10.5962/bhl.title.139322

PICKARD, B. G. (1973). Action potentials in higher plants. *The Botanical Review*, 39(2), 172-201.

WRIGHT, J. P., & FISHER, D. B. (1981). Measurement of the sieve tube membrane potential. *Plant Physiology*, 67(4), 845-848. doi:10.1104/PP.67.4.8456.

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).

FROMM, J., & LAUTNER, S. (2007). Electrical signals and their physiological significance in plants. *Plant, cell & environment*, 30(3), 249-257. doi:10.1111/J.1365-3040.2006.01614.X.

GORA, E. M., & YANOVIK, 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. doi: 10.1139/cjfr-2014-0380

HORWITZ, W. (1939). The theory of electrokinetic phenomena. *Journal of Chemical Education*, 16(11), 519. doi: 10.1021/ed016p519

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. doi: 10.1016/j.plantsci.2006.06.012

OYARCE, P., & GUROVICH, L. (2010). Electrical signals in avocado trees: Responses to light and water availability conditions. *Plant signaling & behavior*, 5(1), 34-41. doi: 10.4161/psb.5.1.10157

DATTA, P., & PALIT, P. (2004). Relationship between environmental factors and diurnal variation of bioelectric potentials of an intact jute plant. *Current Science*, 680-683.

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. doi: 10.1016/j.jplph.2008.06.004

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. doi: 10.1007/BF00196648

VOLKOV, A. G., ADESINA, T., & JOVANOVIĆ, E. (2007). Closing of Venus flytrap by electrical stimulation of motor cells. *Plant signaling & behavior*, 2(3), 139-145. doi: 10.4161/psb.2.3.4217

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. doi: 10.1134/S1021443708020179

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. doi: 10.1016/j.tplants.2006.06.009

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. doi: 10.1104/pp.108.133884

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. doi: 10.2307/3870855

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. doi: 10.1104/pp.113.1.269

STANKOVIC, B., ZAWADZKI, T., & DAVIES, E. (1997). Characterization of the variation potential in sunflower. *Plant physiology*, 115(3), 1083-1088. doi: 10.1104/pp.115.3.1083

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. doi: 10.1016/S0302-4598(00)00075-1

SUKHOVA, E., AKINCHITS, E., & SUKHOV, V. (2017). Mathematical Models of Electrical Activity in Plants. *Journal of Membrane Biology*, 250(5), 407-423. Doi: 10.1007/s00232-017-9969-7

KOPPÁN, A. (2002). Measurement of electric potential difference on trees. *Acta Biologica Szegediensis*, 46(3-4), 37-38.

LE MOUËL, 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. doi: 10.1016/j.crte.2009.12.001

MORAT, P., LE MOUËL, 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.

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.

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.

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.

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

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. doi: 10.4161/psb.6786

- 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. doi: 10.4161/psb.4.2.7872
- 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. doi: 10.4161/15592324.2014.976487
- VOLKOV, A. G., & RANATUNGA, D. R. A. (2006). Plants as environmental biosensors. *Plant signaling & behavior*, 1(3), 105-115
- AAVV. (2008). Distribution map of aleppo pine. EUFORGEN 2009, (JULY 2008), 2009. Retrieved from WWW.EUFORGEN.ORG;
- DE LUIS, M., ČUFAR, K., DI FILIPPO, A., NOVAK, K., PAPADOPOULOS, A., PIOVESAN, G. & SMITH, K. T. (2013). Plasticity in dendroclimatic response across the distribution range of Aleppo pine (*Pinus halepensis*). *PLoS One*, 8(12). doi: 10.1371/journal.pone.0083550
- FADI, B., SEMERCI, H., VENDRAMIN, G.G. (2003). EUROFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for Aleppo pine (*Pinus halepensis*) and Brutia pine (*Pinus brutia*). *International Plant Genetic Resources Institute*. Rome, Italy. 6 pp. ISBN 92-9043-571-2
- MAURI, A., DI LEO, M., DE RIGO, D., CAUDULLO, G. (2016). *Pinus halepensis* and *Pinus brutia* in Europe: distribution, habitat, usage and threats. In: *European Atlas of Forest Tree Species*. ISBN 978-92-79-36740-3.
- 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. doi:10.1016/J.FORECO.2004.07.061
- IFN3 (2007). Tercer Inventario Forestal Nacional (3rd National Forest Inventory of Spain). Ministerio para la Transformación Ecológica y el Reto Demográfico. <https://www.miteco.gob.es/es/biodiversidad/servicios/banco-datos-naturaleza/informacion-disponible/ifn3.aspx>
- LINÁN, I. D., 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.
- 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.
- SAKET, M., ALTRELL, D., VUORINEN, P., DALSGAARD, S., & ANDERSSON, L. G. B. (2004). National forest inventory field manual template. no. August, <http://www.fao.org/3/ae578e/AE578E06.htm>.

PURATICH, F., & WILSON, H. (2013). Valorización integral de la biomasa leñosa agroforestal a lo largo del gradiente altitudinal en condiciones mediterráneas (Doctoral dissertation).

OLIVER-VILLANUEVA, J. V., & BECKER, G. (1993). Verwendungsrelevante Holzeigenschaften der Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und ihre Variabilität im Hinblick auf Alter und Standraum. *Forst und Holz*, 48(14), 387-391.

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(1-2), 1-8. doi: 10.1007/s001070050377

HAPLA, F., & SABOROWSKI, J. (1987). Planning of sample size for wood anatomical investigations. *Holz als Roh-und Werkstoff* (Germany, FR), 45(4):141-144.

SEELING, U., & SACHSSE, H. (1991). Abnorme Kernbildung bei Rotbuche und ihr Einfluß auf holzbiologische und holztechnologische Kenngrößen (Doctoral dissertation, Doctoral thesis, 2nd).

SAUTER, U. (1992). Technologische Holzeigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) als Ausprägung unterschiedlicher Wachstumsbedingungen.

DIX, B., ROFFAEL, E., BECKER, G., & GRUSS, K. (1992). Properties of pulps prepared from poplar wood of different clones, sites and ages. *Papier*. 46:583-592.

WOBST, J. (1995). Auswirkungen von Standortwahl und Durchforstungsstrategie auf verwertungsrelevante Holzeigenschaften der Douglasie (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.(Franco)) (Doctoral dissertation). UNIVERSITY OF GÖTTINGEN

PETERS, S. (1996). Untersuchungen über die Holzeigenschaften der Stieleiche (*Quercus robur* L.) und ihre Beeinflussung durch die Bestandesdichte. *Papierflieger*., UNIVERSITY OF GÖTTINGEN

KRCMAR, P., KURITKA, I., MASLIK, J., URBANEK, P., BAZANT, P., MACHOVSKY, M., & MERKA, P. (2019). Fully inkjet-printed cuo sensor on flexible polymer substrate for alcohol vapours and humidity sensing at room temperature. *Sensors*, 19(14), 3068. doi: 10.3390/s19143068

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. doi: 10.1007/s11356-019-05117-x

DIRECTIVE 1999/5/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 9 March 1999

PRUTCHI, D., & NORRIS, M. (2004). Design and development of medical electronic instrumentation (pp. 326-334). ED. WILEY. ISBN: 978-0-471-67623-2 doi: 10.1002/0471681849

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. doi: 10.1016/0885-5765(88)90049-5

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. doi: 10.1139/b75-271

SCHNEUWLY-BOLLSCHWEILER, M., & SCHNEUWLY, D. M. (2012). How fast do European conifers overgrow wounds inflicted by rockfall. *Tree physiology*, 32(8), 968-975. doi: 10.1093/treephys/tps059

ABBOTT, D. T., & CROSSLEY JR, D. A. (1982). Woody litter decomposition following clear-cutting. *Ecology*, 63(1), 35-42. doi: 10.2307/1937028

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. doi: 10.1139/b63-068

FIELD, A. (2013). Discovering statistics using IBM SPSS statistics. sage, London. ISBN 9781526419521.

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. doi: 10.1080/02827589109382683

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. doi: 10.1007/s10342-012-0669-7

MONTERO, G., CAÑELLAS, I., & RUIZ-PEINADO, R. (2002). Growth and yield models for *Pinus halepensis* Mill. *Forest Systems*, 10(1), 179-201.

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. doi:10.1016/j.jcis.2006.12.075