

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

Rodolfo Zapata Zapata

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.