



2025 | **16-20**
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

9CFE-1241

Organiza





Prevención, detección y monitorización de incendios forestales mediante redes inalámbricas de sensores de bajo coste: el proyecto SenForFire

GUIJARRO, M. (1), DE LA CRUZ, A.C. (1), CARRILLO-GARCÍA, C. (1,2),

MARINO, E. (1), MONTES, F. (1), MADRIGAL, J. (1,2) y HONTAÑÓN, E. (3)

(1) Grupo de Investigación de Incendios Forestales. Instituto de Ciencias Forestales-INIA. CSIC.

(2) Escuela Técnica Superior de Ingeniería de Montes, Forestal y del Medio Natural. UPM.

(3) Departamento de Sensores y Sistemas Ultrasónicos. Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información. CSIC

Resumen

Las redes inalámbricas de sensores (RIS) utilizan módulos electrónicos con sensores de bajo coste que miden in-situ en tiempo real parámetros meteorológicos y ambientales, y están dotados de computación y comunicación inalámbrica. Por su facilidad de despliegue y adaptación a las características de las zonas a monitorizar y por su escalabilidad, las RIS representan una herramienta en auge para la monitorización del riesgo de fenómeno extremos como los derivados del cambio climático. El proyecto Interreg Sudoe “SenForFire” tiene como objetivo demostrar la viabilidad de las RIS para la prevención, detección y monitorización de incendios forestales, desarrollando una herramienta de monitorización meteorológica y ambiental capaz de predecir el peligro de incendio, detectar la presencia de conatos de fuego y predecir la calidad del aire en la zona afectada por el incendio y alrededores con alta resolución espacial y temporal. Para ello, el proyecto cuenta con un consorcio multidisciplinar integrado por 13 entidades de España, Portugal, Francia y Andorra. En esta comunicación, se presenta el proyecto SenForFire y se expone el trabajo llevado a cabo en la primera fase de su desarrollo, con la realización de pruebas experimentales de detección de fuego a pequeña escala en el túnel de viento del ICIFOR-INIA (CSIC). Estos ensayos son previos a las pruebas en campo, con quemas prescritas y quemas agrícolas, que confirmarán la operatividad de las RIS.

Palabras clave

RIS, vigilancia, alerta temprana, pruebas piloto, túnel de viento.

1. Introducción

La prevención de los incendios forestales, su detección temprana, así como la monitorización durante su propagación, constituyen aspectos fundamentales para reducir la incidencia negativa del fuego en los ecosistemas forestales. En ese contexto, las redes inalámbricas de sensores (RIS) de bajo coste pueden constituir una herramienta útil para la prevención, la detección temprana y el seguimiento de incendios forestales, ya que se adaptan a las características de las zonas de riesgo, son fáciles de desplegar y escalables, y su coste es inferior al de otros tipos de redes.

Las RIS buscan complementar tecnologías como la teledetección, que presentan deficiencias tales como una baja resolución espacial y temporal, escasa fiabilidad (alta tasa de falsos positivos) y elevados costes de adquisición, operación



y mantenimiento. En lo que respecta a la detección precoz de incendios, las redes de cámaras ópticas e infrarrojas de alta resolución y aérea (MOHAPATRA & TRINH, 2022) ocupan actualmente un lugar destacado por su capacidad para maximizar el área de cobertura y la identificación de puntos de inicio de incendios. Sin embargo, presentan inconvenientes por la necesidad de energía para la transmisión de información y su elevado coste. Por ello, las RIS de bajo costo y baja potencia están recibiendo una atención cada vez mayor como una solución que permite el monitoreo *in situ* y en tiempo real de los indicadores ambientales de la presencia de incendios (RAJENDRAN & CHENNIAPPAN, 2024).

Las RIS utilizan módulos electrónicos con sensores que miden en tiempo real parámetros meteorológicos y ambientales que determinan el peligro de incendio y están dotados de computación y comunicación inalámbrica, entre sí y con la nube. Los nodos de sensores son sencillos y poco costosos de diseñar e implementar, lo que permite un alto grado de personalización. Además, consumen significativamente menos energía que otros sistemas de detección, lo que disminuye las demandas de complejidad de diseño para las soluciones de suministro de energía y almacenamiento de datos. El auge de los sensores de bajo coste para su aplicación en RIS se está viendo favorecido por los avances en el desarrollo de nuevos materiales de alto rendimiento para una amplia variedad de sensores y de tecnologías de fabricación de sensores rentables para su producción a gran escala (HONTAÑÓN, 2023).

Los sensores de bajo coste cuentan con una amplia utilización en monitorización de la calidad del aire para medir variables climáticas, y la concentración de gases y partículas contaminantes (GÓMEZ-SUÁREZ et al. 2022). Estos elementos también se liberan a la atmósfera como productos de los procesos a los que se somete el combustible forestal desde que entra en contacto con una fuente de calor hasta su ignición y posterior combustión (CICCIOLI et al. 2014), lo que constituye el fundamento del uso de esos sensores para la detección temprana y la monitorización de incendios forestales.

Por lo que se refiere a la prevención de incendios, los sensores de bajo coste podrían tener aplicación para la evaluación del “índice meteorológico del peligro de incendio” (FWI) (STOCKS et al., 1989) frente a los instrumentos de referencia de las redes meteorológicas nacionales.

En este contexto y en el marco del programa Interreg VI-B Sudoe (2021-2027), se aprobó el proyecto “SenForFire.Red inalámbrica de sensores de bajo coste para prevención y detección precoz de incendios forestales” que tiene como objetivo demostrar la viabilidad de las RIS para la prevención, detección y monitorización de incendios forestales, desarrollando una herramienta de observación ambiental con alta resolución espacial y temporal.

2. Objetivos

En esta comunicación se realiza una presentación general del proyecto SenForFire y se exponen los trabajos llevados a cabo en la primera fase del mismo; en particular las pruebas experimentales de detección del inicio de fuego en ensayos con quema de muestras de vegetación realizadas en el túnel de viento del ICIFOR-INIA (CSIC). Estos ensayos han constituido el primer paso para la posterior prueba y validación de los sensores en quemadas en campo, que se desarrollarán en diferentes zonas de Castilla y León, Extremadura y Fundão (Portugal).

3. El Proyecto SenForFire

El consorcio multidisciplinar del proyecto lo integran 13 entidades beneficiarias y seis entidades asociadas del espacio Sudoe (España, Portugal, Francia y Andorra), que se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Integrantes del consorcio del proyecto SenForFire

Entidad	País	Tipo de entidad
Entidades beneficiarias		
CSIC - Instituto de Tecnologías Físicas y de la Información	España	I+D
CSIC - INIA - Instituto de Ciencias Forestales	España	I+D
CSIC - Instituto de Microelectrónica de Barcelona	España	I+D
Arantec Engenharia SL	España	PYME
Ray Ingeniería Electrónica SL	España	PYME
Universidad de Extremadura	España	Universidad
Junta de Castilla y León	España	AA PP
Universidade de Évora	Portugal	Universidad
Universidade de Coimbra	Portugal	Universidad
Município de Fundão	Portugal	AA PP
CNRS - Centre Interuniversitaire de Recherche et d'Ingénierie des Matériaux	Francia	I+D
CNRS - Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes	Francia	I+D
Andorra Recerça i Innovació AR+I	Principado de Andorra	Fundación
Entidades asociadas		
Diputación de Ávila	España	AA PP
Junta de Extremadura	España	AA PP
Agencia Estatal de Meteorología	España	Agencia
Université Toulouse III Paul Sabatier	Francia	Universidad
Comunidade Intermunicipal de Alto Minho	Portugal	AA PP
Ministerio para la Transición Energética y el Reto Demográfico	España	AA PP

CSIC: Consejo Superior de Investigaciones Científicas; CNRS: Centre National de la Recherche Scientifique; INIA: Instituto Nacional de Investigación y Tecnología Agraria y Alimentaria.

El proyecto pivota en torno al uso de sensores de bajo coste para (a) prevención, (b) detección y (c) monitorización de incendios forestales. Para la prevención, la utilización de sensores de bajo coste pretende verificar su rendimiento para la evaluación del “índice meteorológico del peligro de incendio” frente a los instrumentos de referencia de las redes meteorológicas nacionales. Se elaborarán en tiempo real mapas locales del peligro de incendio basados en el FWI, que se contrastarán con los valores oficiales del FWI que proporciona la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET). En la detección, los sensores tienen como objetivo la detección de emisiones de compuestos en la fase inicial de un incendio: compuestos orgánicos volátiles (COVs), gases (CO, H₂, CO₂, CH₄) y partículas (humo). Finalmente, por lo que se refiere a la monitorización de los incendios forestales, la utilidad de los sensores se orienta a la valoración de la calidad del aire, contaminantes gaseosos (NO₂, NH₃, O₃, SO₂) y materia particulada (PM), y de las

emisiones de gases de efecto invernadero.

4. Las áreas piloto

Las pruebas en campo para la validación de las RIS se desarrollarán en siete áreas piloto ubicadas en zonas de especial protección frente a incendios forestales en España, Portugal y Andorra. Las zonas piloto han sido elegidas por las autoridades municipales y profesionales de los operativos regionales para la lucha contra los incendios forestales. Para ello, se ha tenido en cuenta el contexto socio-económico (densidad de población, actividades económicas), la disponibilidad de infraestructuras inalámbricas, la climatología, la meteorología, la orografía y la vegetación, así como la titularidad del terreno (pública o privada) y datos históricos que determinen la vulnerabilidad de las zonas a los incendios forestales. Las zonas piloto incluyen entornos diversos (rural, forestal, interfaz urbano-rural y/o -forestal) de características bien diferenciadas, que se consideren estratégicas y justifiquen el establecimiento de las redes. En las diferentes áreas piloto se llevará a cabo la validación del funcionamiento de los distintos tipos de sensores, realizando quemas agrícolas y/o quemas prescritas para la validación de los sensores cuyo objetivo es la detección y la monitorización de incendios.

Las áreas piloto están situadas en Arenas de San Pedro (Ávila), Las Médulas-Carucedo (León), Jerez de los Caballeros (Badajoz), Santibáñez el Alto (Cáceres), Fundão (Portugal) y Sant Julià de Lòria y La Massana (Principado de Andorra). La Figura 1 presenta la localización de las áreas piloto.



Figura 1. Mapa de localización de las áreas piloto: P1: Arenas de San Pedro; P2: Las Médulas-Carucedo; P3: Jerez de los Caballeros; P4: Santibáñez del Alto; P5: Fundão;

P6: Sant Julià de Lòria; P7: La Massana.

La Figura 2 muestra el aspecto de las cuatro áreas piloto ubicadas en España.



Figura 2. Aspecto de las cuatro áreas piloto del proyecto SenForFire: Superior izquierda, pinar, Arenas de San Pedro; Superior derecha, robledal, Santibáñez el Alto; Inferior izquierda, alcornocal, Jerez de los Caballeros; Inferior derecha, Zona de seguimiento meteorológico, Las Médulas.

Por otra parte, al tratarse de un proyecto Interreg, en el que la cooperación transnacional es imprescindible por el desigual nivel de desarrollo tecnológico de los países participantes, se desarrollará un Plan de Acción para la adopción de RIS y la formación de profesionales en los municipios de las áreas piloto.

5. Los sensores

En el proyecto se diseñarán, desarrollarán y desplegarán en las zonas piloto redes inalámbricas de sensores (RIS) de bajo coste. Los sensores medirán las variables meteorológicas que determinan el FWI, como la temperatura y humedad relativa de la atmósfera, velocidad y dirección del viento y precipitación; así como la humedad del mantillo y la humedad del suelo, de los que se deriva la humedad del combustible forestal. Medirán también variables indicativas de la presencia de fuego como la concentración de compuestos orgánicos volátiles (COVs), gases de combustión (CO, CO₂, H₂, CH₄ y otros), gases (NO₂, O₃, SO₂ y otros) y partículas (PM) contaminantes en la atmósfera.

En el mercado se encuentran sensores de bajo coste de una variedad de tecnologías de medida (principio de funcionamiento) y de fabricación. Se seleccionarán los sensores atendiendo a su tamaño, rendimiento para la aplicación de interés, escalabilidad de la producción, facilidad de lectura de la señal, consumo energético y durabilidad (vida útil).

Los datos adquiridos por los sensores se transmitirán en tiempo real a la nube mediante la tecnología inalámbrica LoRa, de bajo consumo energético y largo alcance. Se diseñará e implementará una plataforma en la nube con capacidades de almacenamiento, procesamiento y análisis inteligente (IA) de gran volumen de datos, que convertirá los datos adquiridos por las RIS en información útil para las autoridades municipales, operativos de la lucha contra los incendios forestales y población local.

6. Las quemas en el túnel de viento

La primera fase de verificación del funcionamiento de los sensores se ha llevado a



cabo en el túnel de viento del ICIFOR-INIA, CSIC. Este dispositivo experimental, situado al aire libre, consta de un recinto térmico y de un ventilador, y se complementa con un sistema electrónico de captación de temperaturas. El recinto térmico tiene 8,5 m de longitud y una sección transversal de 2 m x 3 m; su suelo está formado por ocho vagonetas independientes de 1,0 m x 0,8 m de superficie y 0.25 cm de altura, rellenas de arena, de modo que forman una superficie de 8,0 m x 0,8 m sobre el que se dispone el combustible a estudiar. El ventilador, destinado a crear un flujo de aire que simula la acción del viento en el recinto térmico, está controlado por un sistema electrónico que permite obtener valores de velocidad del viento comprendidas entre 1 y 7 m/s en el área central del recinto térmico. El sistema electrónico de captación de temperaturas está integrado por un Data Logger, y termopares de tipo K y 1 mm de diámetro, que se sitúan en el recinto térmico en función de las características del complejo de combustible en el que se analiza la propagación del fuego. Las temperaturas alcanzadas durante los ensayos pueden registrarse con un intervalo mínimo de 1 segundo. El túnel de viento permite reproducir diferentes complejos de combustible forestal: hojarasca, herbáceas, matorral, restos de corta, tepes de suelo... reconstruyendo su estructura original en campo o variando sus características (carga, humedad, ...) dependiendo del objetivo de los ensayos (MADRIGAL et al., 2014).

Para la fase de prueba y puesta a punto de los sensores del proyecto SenForFire en el túnel de viento, se han llevado a cabo dos series de ensayos:

1. Ensayos con *Pinus pinea*: ramas con acículas verdes con 130% de contenido de humedad, ramas con acículas verdes secadas tres horas en estufa a 40 °C, con un contenido de humedad del 110%, y acículas de la cubierta muerta acondicionada en cámara (temperatura = 23 °C, humedad relativa = 50%), con un contenido de humedad del 12%.
2. Ensayos con vegetación recogida en la zona piloto de Arenas de San Pedro, especies del sotobosque de pinar de *Pinus pinaster*: *Erica sp.* con un 62% de contenido de humedad, *Cistus laurifolius* con un 58% de contenido de humedad y *C. monspeliensis* con un 38% de contenido de humedad.

La combustión de la vegetación se forzó por contacto con un radiador eléctrico con potencia calorífica constante de 500 W (epirradiator). Los ensayos se llevaron a cabo sin viento y con velocidades del viento generado por el ventilador de 1, 2 y 3 m.s⁻¹. La Figura 3 muestra la disposición de los módulos con los sensores para los ensayos llevados a cabo en el túnel de viento así como el aspecto de uno de estos ensayos. La Figura 4 presenta un ejemplo de gráficas de las señales recogidas por diferentes sensores.

MT 6: FUEGO Y OTROS RIESGOS ABIÓTICOS



Figura 3. Ensayos en túnel de viento: Aspecto de la disposición de los módulos con los sensores y de uno de los ensayos realizados con ramas con acículas verdes de Pinus pinea.

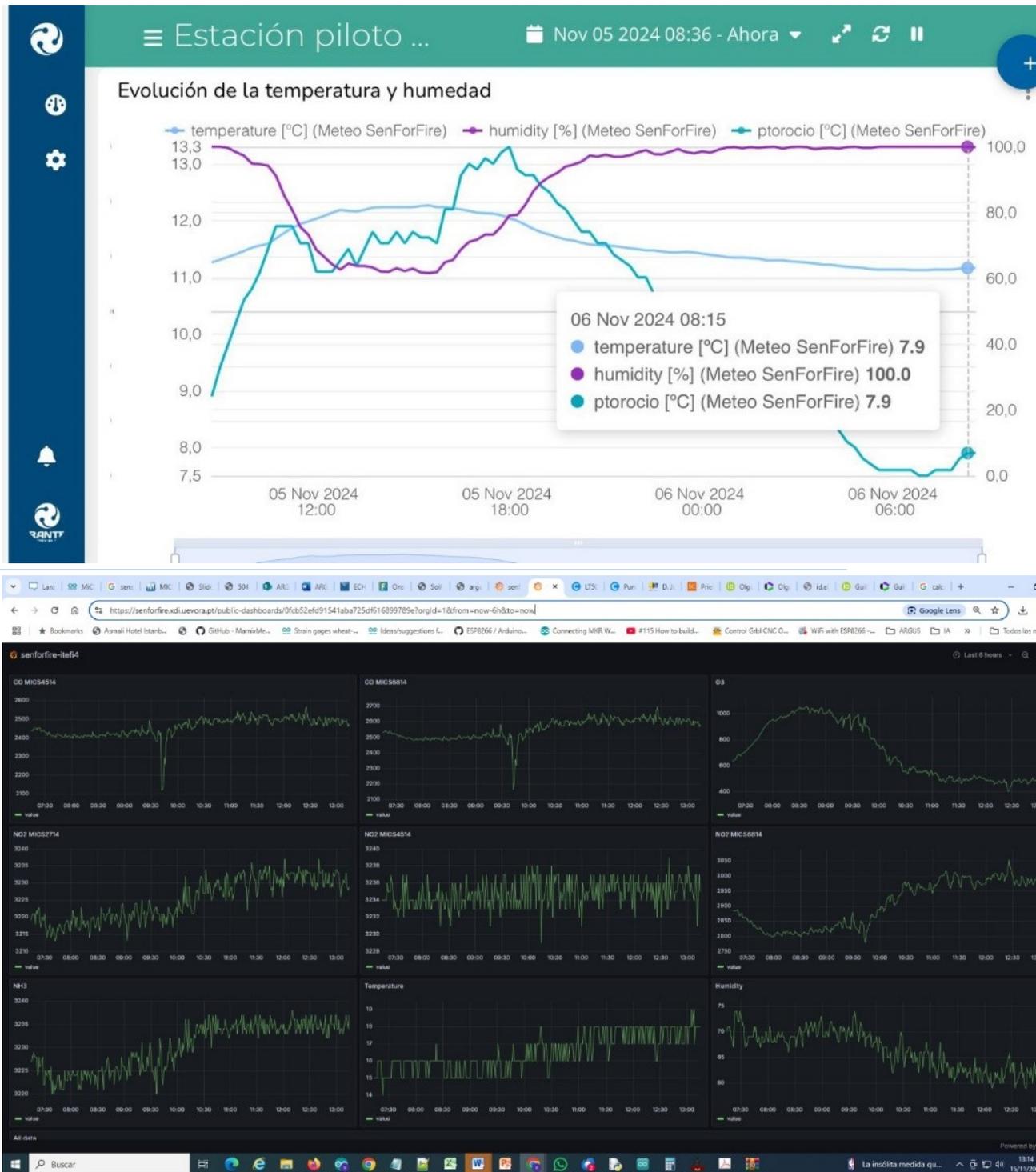


Figura 4. Ensayos en túnel de viento. Ejemplos de gráficas de las señales recogidas por diferentes sensores durante los ensayos. Superior: Sensores meteorológicos; Inferior: Sensores de detección de gases de combustión.

7. Balance y perspectivas



En un balance inicial de esta primera fase, pendientes de analizar los datos captados por todos los sensores, se puede decir que todos los sensores de CO, CO₂, NO₂, NH₃ y O₃ respondieron al inicio del fuego. No obstante, es necesario aún verificar cuánto tiempo tardaron en responder al inicio del fuego y la intensidad de la respuesta y, sobre todo, comparar con los sensores de gases electroquímicos. Asimismo, se ha podido verificar la correcta transmisión en tiempo real de los datos adquiridos por los sensores a la nube la tecnología inalámbrica LoRa. El análisis de todos los datos recogidos por los distintos tipos de sensores permitirá elegir los más adecuados para su validación en la segunda fase del proyecto, mediante la disposición de los módulos en campo, tanto para el seguimiento de las variables meteorológicas y de humedad del suelo a diferentes profundidades, como para la detección y monitorización de quemas agrícolas y/o prescritas.

Algunos ejemplos de los resultados que se esperan obtener en SenForFire son mapas de peligro de incendio, actual y su evolución a corto plazo, mensajes de alerta y alarma, mapas de calidad del aire, etc. que facilitarán la toma de decisiones y permitirán actuar con celeridad y eficacia, proporcionando una respuesta acorde al nivel de peligro de incendio estimado en cada momento.

Como resultado final de este proyecto Interreg, el consorcio considera que se beneficiarán los municipios (tecnología innovadora para la gestión eficaz de los riesgos ambientales), los propietarios y usuarios del suelo (protección de cultivos, pastos, bosques y ganado), las pymes (productos y servicios de alto valor añadido y profesionales cualificados), la población joven (trabajo de calidad y emprendimiento) y la población en general (protección de la salud, propiedades, infraestructuras, patrimonio natural y cultural) del Sudoeste rural.

8. Agradecimientos

Este trabajo se enmarca en el proyecto Interreg Sudoeste SenForFire. Red inalámbrica de sensores de bajo coste para prevención y detección precoz de incendios forestales (S1/1.1/E0040), cofinanciado por la Unión Europea.

9. Bibliografía

CICCIOLI, P.; CENTRITTO, M.; LORETO, F. 2014. Biogenic volatile organic compound emissions from vegetation fires. *Plant, Cell and Environment* 37: 1810-1825. Doi: 10.1111/pce.12336.

GÓMEZ-SUÁREZ, J.; ARROYO, P.; CERRATO-ÁLVAREZ, M.; HONTAÑÓN, E.; MASA, S.; MENINI, P.H.; PRESMANES, L.; ALFONSO, R.; PINILLA-GIL, E.; LOZANO, J. 2022. Development and field validation of low-cost metal oxide nanosensors for tropospheric ozone monitoring in rural areas. *Chemosensors* 10; 478. Doi: 10.3390/CHEMOSENSORS10110478.

HONTAÑÓN, E. 2023. Current status of micro/nanosensors and their potential applicability to the prevention and early detection of forest fires. Proceedings of the 6th Experiment at International Conference, Évora, Portugal, pp. 261-265. Doi: 10.1109/exp.at2358782.2023.10545827.

MADRIGAL, J.; GUIJARRO, M.; HERNANDO, C. 2014. El Túnel de Viento del INIA-CIFOR como dispositivo experimental para el estudio de los incendios forestales. *Cuadernos de la Sociedad Española de Ciencias Forestales* 40: 203-214. Doi: 10.31167/csef.v0i40.17361.



MOHAPATRA, A.; TRINH, T. 2022. Early wildfire detection technologies in practice. A review. *Sustainability* 14: 12270. Doi: 10.3390/su141912270.

RAJENDRAN, S.; CHENNIAPPAN, N. 2024. A comprehensive survey on several fire management approaches in wireless sensor networks. *Bulletin of Electrical Engineering and Informatics* 13: 947-954. Doi: <https://doi.org/10.11591/eei.v13i2.5833>.

STOCKS, B.J.; LAWSON, B.D.; ALEXANDER, M.E.; VAN WAGNER, C.E.; MCALPINE, R.S.; LYNHAM, T.J.; DUBÉ, E. 1989. The Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview. *The Forestry Chronicle*. 65(6): 450-457. doi.org/10.5558/tfc65450-6