

# ESTUDIO DE LOS DAÑOS PRODUCIDOS POR EL FUEGO EN ARBOLES, UTILIZANDO METODOS BIOELECTRICOS

## I. PINO RADIATA

S. BARA  
J. A. VEGA  
M. ALONSO

Centro de Investigaciones Forestales de Lourizán  
Xunta de Galicia

### RESUMEN

Se realizó la quema de una parcela de *P. radiata* de 16 años de edad, en condiciones parecidas a un incendio de verano, con el fin de seguir la evolución de los daños por medio de la conductividad, biocorriente y ondas cuadradas. Próxima a esta parcela se estableció otra que sirvió como testigo.

La medida de la conductividad discrimina bien los árboles dañados de los testigos. Los valores de la biocorriente son algo más elevados en los árboles quemados que en los testigos, aunque su significación es menor que la de la conductividad.

El empleo de ondas cuadradas, con el método de una sonda, da resultados muy significativos. Los voltajes de salida, en los árboles quemados, son inferiores a los del testigo, en los tres rangos de frecuencia utilizados (50, 1K y 50K Hz). El valor de la razón  $V_{50}/V_{50K}$  se mantiene más alto en los árboles quemados, aunque la diferencia relativa no es grande.

Con el método de tres sondas, la media general de los voltajes de salida es mayor en los árboles quemados que en los testigos, en el primer período de seguimiento. En el segundo período, esta media es menor en los árboles quemados. La razón  $V_{50}/V_{50K}$  es mayor en los árboles quemados, durante todo el desarrollo de la experiencia. Se consideran varias relaciones, entre los valores de las mediciones, que son muy significativas en la determinación de los daños.

Con los datos obtenidos con el método de una sonda, al mes de iniciada la experiencia, es posible predecir los árboles que terminarán muriendo.

**PALABRAS CLAVE:** Métodos bioeléctricos  
Conductividad  
Resistencia eléctrica  
Ondas cuadradas  
*P. radiata*  
Daños por el fuego

### INTRODUCCION

El elevado número de incendios que están soportando los montes gallegos deja numerosas masas forestales dañadas. El conocimiento del grado y evolución de este daño podrá permitir una adecuada planificación del destino de estos árboles afectados por el fuego.

Recibido: 16-7-91

Aceptado para su publicación: 24-10-91

La determinación y seguimiento de los daños producidos por el fuego no es tarea fácil. Una masa puede quedar muy afectada sin que, en principio, se pueda saber cómo va a evolucionar con posterioridad.

El interés por estos temas nos llevó a publicar un trabajo en el que dábamos a conocer la aplicación de estos métodos a plantas de *P. pinaster* en macetas (Bara, Alonso, Vega, 1990).

El estudio del fuego prescrito, como un medio para reducir el combustible del sotobosque y con ello el peligro de incendio (Vega, Bara, Gil, 1983), nos planteó el problema de conocer los posibles daños que estos tratamientos podrían causar al arbolado. La medición de la resistencia eléctrica produjo buenos resultados, pudiéndose conocer anticipadamente la evolución de la planta, en el sentido de que el aumento de la resistencia va asociado al incremento de los daños.

El empleo de ondas cuadradas se mostró particularmente eficaz en la determinación y seguimiento de los daños (Bara *et al.*, 1990). Los valores de los voltajes de salida, pico a pico, para 50 Hz y 50 KHz, con el método de una sonda, son los más bajos, dentro de una serie variada de daños.

Es muy característica la relación  $V_{50}/V_{50K}$ , cuyo valor queda por encima de los correspondientes a otros tipos de daño.

Las zonas necróticas presentan ondas triangulares, a frecuencias tan bajas como 5 KHz.

El presente estudio tiene por objeto conocer cómo un incendio afecta a una masa arbórea de *P. radiata*, siguiendo su evolución por medios biofísicos.

## DESCRIPCION DEL SITIO

La experiencia se llevó a cabo en el monte del Sino, situado en terrenos del Centro de Investigaciones Forestales de Lourizán, en un rodal de unos 250 m<sup>2</sup> de *P. radiata* de 16 años y una densidad de 1.300 pies/ha, localizado en una ladera del 29 p. 100 de pendiente y una orientación Oeste. La plantación es de calidad bastante mediocre y vive en un suelo de muy escasa profundidad, desarrollado sobre substrato de gneis que presenta frecuentes afloramientos rocosos. La vegetación del sotobosque es muy rala y pobre en especies, estando integrada, casi exclusivamente, por *Calluna vulgaris*, *Agrostis setacea* y *Ulex europaeus*. La zona está a unos 50 m de altitud sobre el nivel del mar, recibiendo 1.750 mm de precipitación media anual. El clima es atlántico, con inviernos suaves, estando la lluvia, en conjunto, bastante bien repartida, con una temperatura media anual de 14° C y corta sequía de verano (clave V [VI] de la clasificación fitoclimática de Allue, 1968).

Las características dendrométricas del rodal indican (Tabla 1) que, efectivamente, se trata de una plantación de muy baja calidad. Sin duda que el estado de muy baja fertilidad que presenta el monte Sino (Bara, 1986) y un suelo notablemente superficial dificultan el crecimiento del arbolado. Por otro lado, el *P. radiata* demuestra estar, en esta zona de las Rías Bajas, fuera de su estación, sufriendo frecuentes e intensos ataques de la enfermedad de la banda roja (*Dothistroma pini*) y de la procesionaria (*Taumatopoea pythiocalpa*). En este rodal no se observaba este insecto, pero era evidente la presencia de la mencionada enfermedad. Esto puede haber condicionado la respuesta del fuego, aunque como ese estado es compartido prácticamente por todas las masas de la especie, en el área citada, las conclusiones podrían hacerse también extensivas a ellas.

TABLA 1

## CARACTERISTICAS DENDROMETRICAS INICIALES DE LAS PARCELAS TESTIGO Y QUEMADA

*Initial tree characteristics on control and burned plots*

|         | Diámetro normal (cm) |           | Altura total (m) |         | Espesor de la corteza a 1,3 m (cm) |         |
|---------|----------------------|-----------|------------------|---------|------------------------------------|---------|
|         | Valor medio          | Rango     | Valor medio      | Rango   | Valor medio                        | Rango   |
| Testigo | 15,6                 | 10,4-21,9 | 8,0              | 7,2-8,1 | 1,5                                | 0,5-2,0 |
| Quemada | 15,6                 | 7,8-20,8  | 8,0              | 7,2-9,0 | 1,1                                | 0,2-1,7 |

## MATERIAL Y METODOS

Dentro del área citada se señalaron dos parcelas de 80 m<sup>2</sup> (10 × 8). Una para ser quemada simulando un incendio de verano y otra que actuó como testigo. El diámetro de los árboles de las parcelas se midió con forcípula a 1,30 m en cruz y la altura con un hipsómetro Blume-Leiss, numerándose cada árbol para su identificación. El grosor de la corteza de cada pie fue determinado con un medidor de corteza, en las caras orientadas hacia los cuatro puntos cardinales.

En el lugar destinado a ser quemado se acumularon restos de matorral de *Ulex sp* y *Chamaespartium tridentatum* previamente rozado y secado en estufa y posteriormente dejado al aire, en el exterior, durante varias semanas, así como abundantes restos leñosos de *Pinus pinaster* que habían sido tratados de igual forma. Todo este material se distribuyó por el área a quemar, formando una capa relativamente continua de unos 0,50 m de altura media. El aspecto de la parcela preparada para la quema puede verse en la Foto 1. El objeto de este aporte de material combustible fue producir un fuego de mayor intensidad que el que se podría originar con el escaso material presente, sobre todo teniendo en cuenta las reducidas dimensiones del lugar de ensayo.

Antes de efectuar la quema se realizó un inventario de la cantidad total de combustible presente. Para ello, se dispusieron aleatoriamente 10 cuadros de 30 × 30 cm recolectándose toda la vegetación susceptible de arder, incluyendo la hojarasca y el mantillo. Todo ese material fue colocado en una estufa a 100° C durante 24 horas y pesado para obtener la carga referida a peso seco. Una submuestra de cada muestra de mantillo se calcinó en el horno para determinar el porcentaje de tierra mineral adherida, descontando esa fracción para obtener la carga.

La parcela a quemar fue rodeada perimetralmente por una pequeña faja desprovista de combustible para actuar de cortafuegos.

Se situaron tres series de termopares en el interior de la parcela a quemar. Cada serie la integraban tres termopares tipo K (aleación Ni-Cr, Ni-Al), dispuestos en el mismo plano vertical y colocados paralelamente a la superficie del terreno en tres posiciones: el primero, de 1 mm de diámetro, en la interfaz de separación entre la hojarasca y el mantillo; el segundo, del mismo diámetro, por debajo de éste y en la superficie de separación del mantillo y el suelo mineral; finalmente, el tercero, de 3 mm de diámetro, a 2,5 cm bajo la superficie del suelo mineral. Con esto se pretendía recoger información sobre el régimen térmico

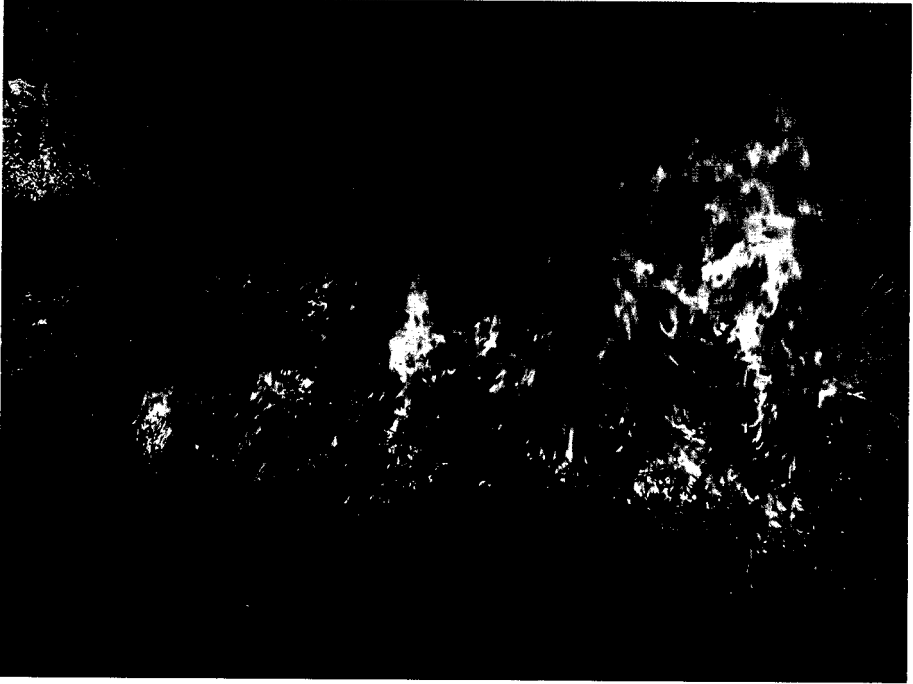


Foto 1.—Aspecto del desarrollo del fuego durante la experiencia.

*Fire behavior during the experiment.*

producido por el fuego en la superficie, en la cubierta vegetal del suelo y en los primeros centímetros de éste. Al mismo tiempo, se situó 1 termopar, de tipo K y 1 mm de diámetro, en cada uno de los 10 árboles de la parcela. Para ello, a 70 cm del suelo, se practicó sobre el tronco un pequeño orificio del mismo diámetro que el termopar, a través de la corteza, perforándola con mucho cuidado hasta la parte más externa del tejido leñoso, e introduciendo la punta del termopar hasta tocar con él, suponiendo que en ese momento se hacía contacto con la zona del cambium. El termopar se colocó perpendicularmente al eje del tronco y su posición se fijó por medio de alambre. Puesto que se pensó que el fuego progresaría a favor de la pendiente de la ladera, era de esperar que las temperaturas más altas se alcanzaran en la cara del árbol a sotavento del fuego, como ya habían indicado los estudios de Fahnestock, Hare (1964), Tunstall *et al.* (1976) y Gill (1974).

Los termopares se conectaron a un registrador Philips 3086 de 30 canales, provisto de un sistema automático de compensación de junta fría de referencia, que midió cada canal a intervalos de 30 segundos.

Inmediatamente antes de quemar, se recogieron muestras de diferentes componentes de los combustibles y de los 2,5 cm primeros del suelo y se colocaron en recipientes herméticos para la determinación del contenido de agua. A continuación se procedió a encender el fuego quemando una pequeña faja de seguridad de un par de metros y seguidamente se dio un fuego a favor de la pendiente. Durante la quema se tomaron datos de la temperatura del aire, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. La velocidad media de avance del

fuego se determinó midiendo con un cronómetro el tiempo empleado por el frente en recorrer una distancia de unos 8 metros, en el sentido longitudinal de la pendiente. La longitud de llamas se estimó visualmente y a través de fotografías con jalones de tamaño conocido.

Después de quemar se tomaron muestras de los combustibles remanentes y se midió la altura mínima y máxima de chamuscado del tronco y altura media del chamuscado de copas.

Los parámetros bieléctricos, que habían sido medidos antes que la quema, se volvieron a medir al día siguiente.

En todos los árboles de las parcelas testigo y quemada se midieron las biocorrientes. Esta técnica consiste en introducir en el suelo un electrodo de cobre y otro de hierro en el floema del árbol. Estos electrodos se unen, por medio de conductores, a un microamperímetro portátil, capaz de apreciar 0,01 microamperios. Las mediciones se hacen a 30 cm y a 1,30 m del suelo. También se midió la conductividad. Para ello se clavó una sonda con dos agujas, separadas 1 cm, en el floema del árbol, a 1,30 m de altura del suelo. La sonda va conectada a un conductímetro portátil.

El seguimiento por ondas cuadradas consiste en analizar la atenuación y cambio de forma que sufre una onda, generada por un oscilador, al ser inyectada en el floema del árbol, a 30 cm del suelo, por medio de dos electrodos. Esta onda se recoge por medio de otro electrodo y la masa común, llevándola a un osciloscopio. La sonda consta, por tanto, de tres electrodos.

Estas mediciones se realizan a varias frecuencias, con una tensión de entrada de 6 Vpp. El método así concebido constituye lo que denominamos método de una sonda (1S). Hemos realizado una variante, que consiste en inyectar la señal del oscilador por medio de una sonda, con dos electrodos (finas agujas de acero), y recogerla con otras dos del mismo tipo, que van conectadas a cada uno de los canales de un osciloscopio de doble haz. Entre cada sonda y la siguiente hay 1 metro de distancia y van colocadas en el tronco siguiendo un plano vertical. La señal se puede inyectar en tres posiciones distintas, tal como se indica en la Figura 1, lo que da lugar a tres tipos de medición, ya que el árbol no se comporta como isótropo. Esto constituye lo que denominamos método de tres sondas (3S). Estas técnicas se describen con detalle en Bara *et al.*, 1990.

Todas las mediciones se repitieron cada 15 ó 20 días, a lo largo del período de seguimiento de la experiencia.

## RESULTADOS Y DISCUSION

### Comportamiento del fuego

La carga inicial total del combustible fue elevada (Tabla 2) aun excluyendo el mantillo, siendo el orden de 2,2 veces las del modelo estándar n.º 6 (Anderson, 1982), al que recuerda aunque más compactado. La cantidad total consumida durante el fuego fue bastante alta, representando el 80,3 p. 100 de la inicial, elevándose, en el caso del combustible añadido, al 91,3 p. 100 del inicial y al 100 p. 100 de la hojarasca.

La carga fina (menor de 6 mm de diámetro) representaba el 48,2 p. 100 de la total, y si se considera sólo el combustible superficial, suponía el 66,9 p. 100. Teniendo en cuenta esto, la escasa presencia de vegetación viva, así como el bajo contenido de agua de la vegetación seca fina (Tabla 3), es lógico pensar que prácticamente todo el combustible fino superficial debió consumirse en la etapa de llamas.

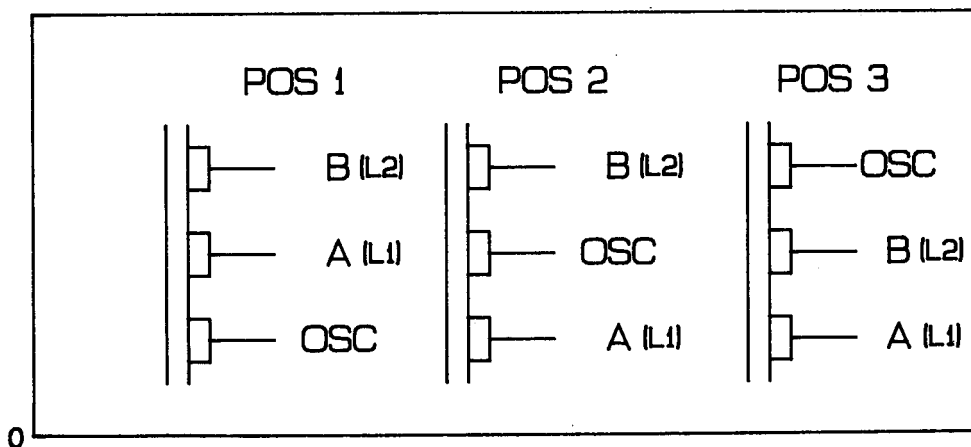


Fig. 1.—Posiciones de medida con el método de 3 sondas.  
3 probe method measure positions.

**TABLA 2**  
**CANTIDADES DE COMBUSTIBLE EN g/m<sup>2</sup> ANTES Y DESPUES DE QUEMAR**  
*Fuel load before and after burn (g/m<sup>2</sup>)*

| Componente                                  | Carga inicial | Carga inicial<br>superf. < 6 mm<br>de diámetro | Carga después<br>de quemar | Carga<br>consumida |
|---------------------------------------------|---------------|------------------------------------------------|----------------------------|--------------------|
| Combustible añadido +<br>vegetación inicial | 1.835         | 1.284                                          | 247                        | 1.588              |
| Hojarasca                                   | 159           | 159                                            | —                          | —                  |
| Mantillo                                    | 1.157         | —                                              | 411                        | 746                |
| Total                                       | 3.151         | 1.443                                          | 658                        | 2.334              |

**TABLA 3**  
**CONTENIDO EN AGUA DE LOS COMBUSTIBLES Y CONDICIONES METEOROLOGICAS  
DURANTE LA QUEMA**

*Fuel moisture content and meteorological conditions during the burn*

| PORCENTAJES DE AGUA REFERIDOS AL PESO SECO |                            |                            |                                                 |           |           |
|--------------------------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------------------------------|-----------|-----------|
| Vegetación<br>viva fina                    | Vegetación<br>seca fina    | Diámetro de restos leñosos |                                                 |           | Hojarasca |
|                                            |                            | ≤ 6 mm                     | 6-25 mm                                         | 25-75 mm  |           |
| 173                                        | 8                          | 16                         | 27                                              | 29        | 12        |
| CONDICIONES METEOROLOGICAS                 |                            |                            |                                                 |           |           |
| Humedad relativa<br>del aire               | Temperatura<br>del aire °C |                            | Velocidad viento<br>dentro del pinar<br>(m/min) | Dirección |           |
| 78                                         | 25                         |                            | 1,0                                             | SW        |           |

TABLA 4

**VELOCIDAD DE AVANCE DEL FUEGO, LONGITUD DE LLAMAS, ENERGIA TOTAL DESPRENDIDA EN EL FUEGO E INTENSIDAD LINEAL DEL FRENTE DE LLAMAS**

*Fire rate of spread, flame length, total energy released during the fire and linear fire intensity*

| Velocidad media de avance<br>m/minuto | Longitud media de llamas<br>(m) | Energía desprendida por unidad de superficie<br>Kj/m <sup>2</sup> (1) | INTENSIDAD LINEAL Kw/m |                                   |                                              |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|------------------------|-----------------------------------|----------------------------------------------|
|                                       |                                 |                                                                       | Según Byram (1)        | A partir de la longitud de llamas | A partir de la altura de chamuscado de copas |
| 2                                     | 2                               | 43.903                                                                | 905                    | 1.229 (2)<br>650 (3)<br>1.970 (4) | 622 (5)                                      |

(1) Energía desprendida en la fase de llamas según Byram (1959).

(2) Obtenida a través de la fórmula de Byram (1959).

(3) Obtenida mediante la fórmula de Thomas (1963).

(4) Obtenida mediante la fórmula de Nelson y Adkins (1969).

(5) Según la fórmula de Van Wagner (1973).

Las condiciones atmosféricas durante la quema fueron las normales de un día de verano en el área sur de Pontevedra, con temperaturas moderadamente altas y régimen de brisas costeras con humedad relativa alta.

En la Tabla 4 se resumen algunas características del comportamiento del fuego. La velocidad de avance fue baja, pero con una altura de llamas relativamente grande, indicando una intensidad de reacción moderadamente alta. La intensidad lineal del frente de llamas fue calculada por varios métodos. En primer lugar, por la expresión típica de Byram (1959), considerando que el combustible consumido fue todo el de diámetro inferior a 6 mm. Seguidamente, se obtuvo el valor de la intensidad mediante la fórmula del mismo autor, que liga esta variable con la longitud de llamas. A continuación se usó la fórmula de Thomas (1963) y también la aproximación de Nelson y Adkins (1986), que relacionan las citadas variables. Finalmente, la fórmula de Van Wagner (1973), que determina la altura del chamuscado en función de la temperatura ambiente, la velocidad del viento y la intensidad lineal, se usó para obtener esta última variable a partir de las otras.

Los valores hallados mediante las dos fórmulas de Byram son algo distintos, lo que no es extraño, especialmente teniendo en cuenta lo poco precisa que resulta la medición de la longitud de las llamas, que está sujeta a frecuentes errores y a una notable carga de subjetividad. El cálculo, según Thomas, subestima algo la intensidad en relación a los valores hallados por las relaciones de Byram. La estimación basada en la fórmula de Nelson y Adkins da, en cambio, una cantidad más elevada. Por último, el valor obtenido mediante la fórmula de Van Wagner resulta algo bajo. Tal vez el reducido tamaño de la parcela y su pendiente sean un obstáculo para la aplicación de su ecuación, que fue determinada para carreras del fuego mayores y en sitio llano.

El fuego completó su fase de llamas en pocos minutos (aproximadamente 10), mientras que la etapa de rescoldos duró sobre una hora y media, siendo más duradera en la parte inferior de la parcela, donde se situó la serie n.º 1 de termopares.

Aceptando como valor más aproximado la media de las estimaciones anteriores, esto es, 1.075 Kw/m, el fuego experimental realizado puede considerarse de moderada intensidad (Cheney, 1981), reflejando un tipo de incendio muy frecuente en Galicia.

Respecto al régimen térmico del suelo, producido por el fuego, las Figuras 2, 3 y 4 indican la variación de la temperatura con el tiempo, para las tres series y las tres posiciones, resumiendo la Tabla 5 los valores más característicos.

Las formas de las curvas se corresponden con las posiciones de los termopares. Así, las de la interfaz hojarasca/mantillo son alargadas y estrechas, reflejando la consumición rápida de la capa de hojarasca fresca por el frente de llamas. La curva más «ancha» y de temperatura máxima bastante menor, refleja la transmisión del calor a través de la capa orgánica del mantillo hasta la superficie del suelo. Finalmente, las del suelo muestran la velocidad más baja de ascenso de la temperatura, consecuencia de su escasa conductividad, con un ligero descenso inicial producido por la evaporación del agua.

Las tres series muestran una gran semejanza en la interfaz hojarasca/mantillo, con un rango de variación pequeño, que aumenta en la superficie del suelo, principalmente debido a la duración de la combustión con rescoldo, que en la serie 1 es manifiesta. A 2,5 cm bajo la superficie del suelo las temperaturas alcanzan los 60° C en las series 1 y 3. En esta última, esa temperatura fue mayor en la superficie del suelo, indicando una propagación lateral del calor, típica también de la combustión con rescoldo.

Desde el punto de vista de daños a las raíces del arbolado, los datos anteriores indican que en los pinos correspondientes a las series 1 y 3 se produciría fácilmente la muerte de las raicillas finas que son afectadas por temperaturas más bajas que otros órganos vegetales, especialmente si el suelo está húmedo, cosa que ocurrió en nuestro caso, donde el contenido de agua referida a peso seco fue del 20 p. 100. Así, Ursic (1961) encontró que la muerte de raicillas de pino ocurrió entre 48 y 54° C, según el tiempo de exposición, y Levitt (1980) indica que el calentamiento del suelo a unos 55° C induce la muerte de los tejidos de plantas superiores.

**TABLA 5**  
**TEMPERATURAS Y DURACION DE LAS MISMAS EN DIFERENTES POSICIONES,**  
**DURANTE LA QUEMA**

*Temperature characteristics during the fire*

| Posición<br>del termopar                | Temperatura<br>máxima media<br>°C |         | Tiempo medio<br>con temperatura<br>mayor de 60° C<br>minutos |       |
|-----------------------------------------|-----------------------------------|---------|--------------------------------------------------------------|-------|
|                                         | Valor<br>medio                    | Rango   | Valor<br>medio                                               | Rango |
| Interfaz hojarasca<br>mantillo          | 688                               | 646-721 | 18                                                           | 13-24 |
| Interfaz mantillo<br>suelo mineral      | 83                                | 37-167  | 19                                                           | 0-58  |
| 2,5 cm bajo superficie<br>suelo mineral | 52                                | 38-60   | 3                                                            | 0-9   |

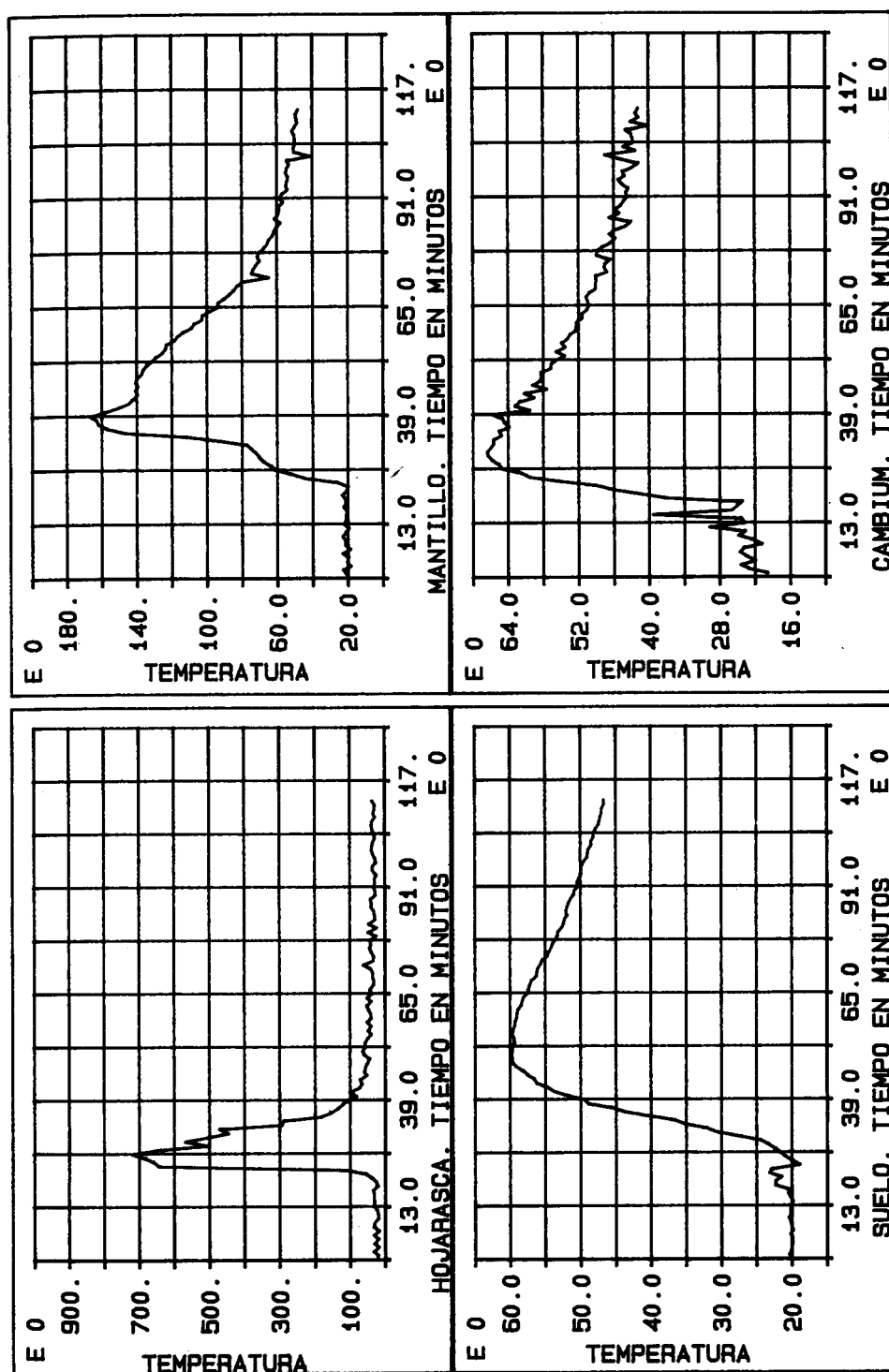


Fig. 2.—Variación de la temperatura en la hojarasca, mantillo, suelo mineral y en el cambium durante la quema. Serie 1 de termopares.  
Temperature variation in the litter, duff, mineral soil and tree cambium, during the burn. Thermocouples series 1

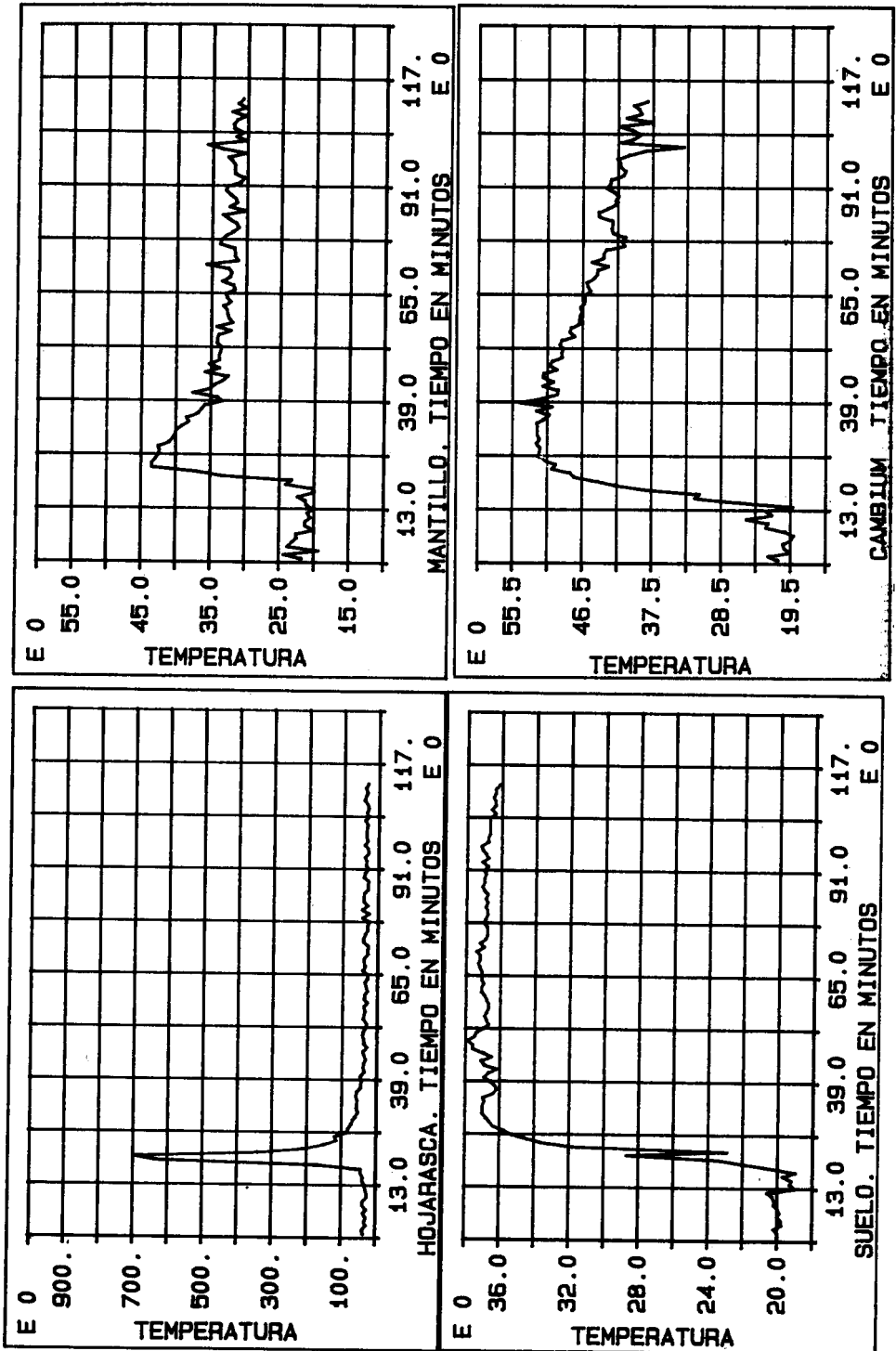


Fig. 3.—Variación de la temperatura en la hojarasca, mantillo, suelo mineral y en el cambium durante la quema. Serie 2 de termopares.  
 Temperature variation in the litter, duff, mineral soil and tree cambium, during the burn. Thermocouples series 2.

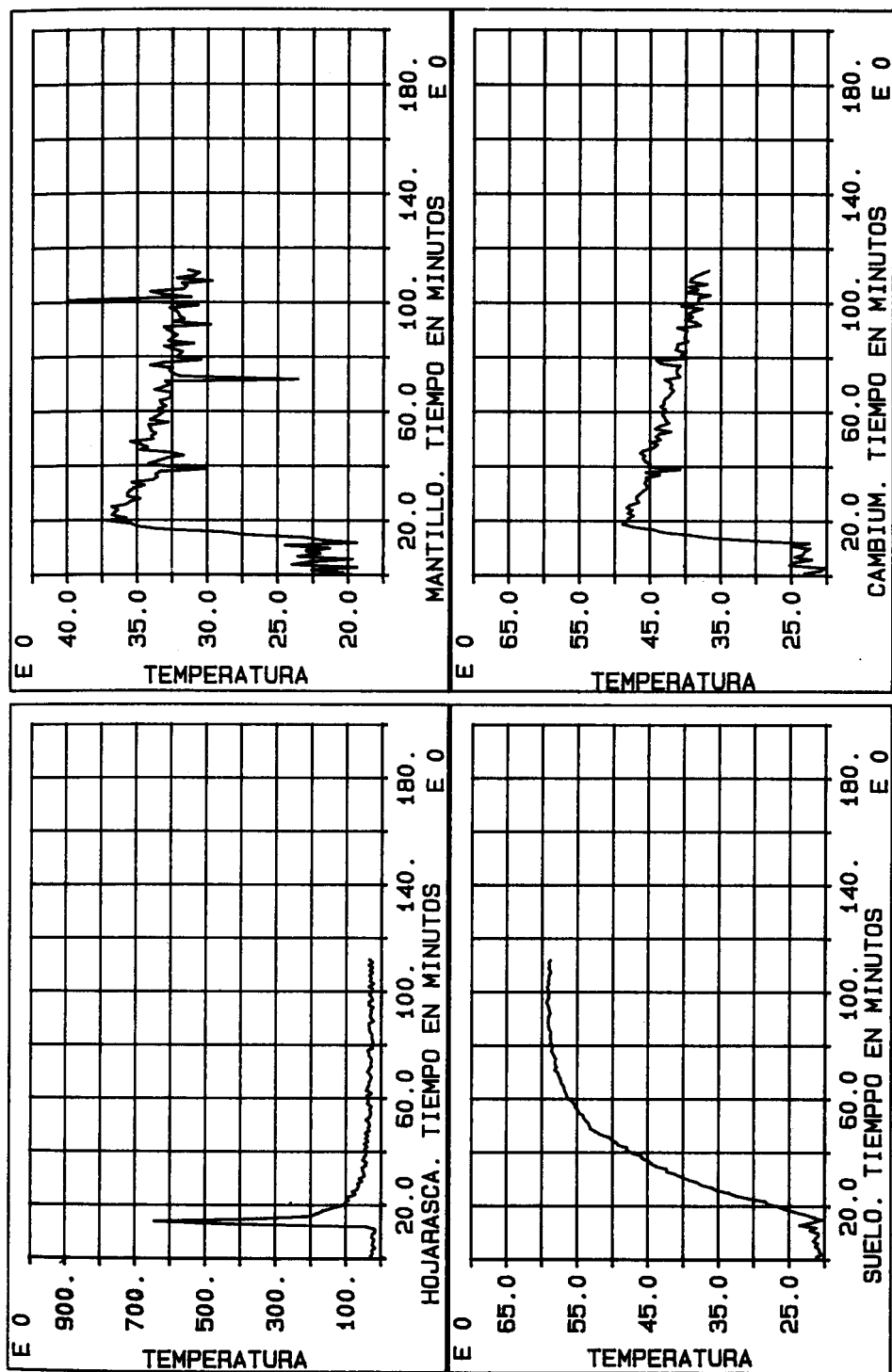


Fig. 4.—Variación de la temperatura en la hojarasca, mantillo, suelo mineral y en el cambium durante la quema. Serie de 3 termopares.  
Temperature variation in the litter, duff, mineral soil and tree cambium, during the burn. Thermocouples serie 3.

En principio, serían de esperar, por este motivo, mayores daños en los árboles más próximos a las series 1 y 3, aunque habría que tomar con reserva esta indicación dado que el sistema radical se extiende por una considerable superficie, existiendo de hecho un entramado de raíces de varios pies en el pequeño espacio de las parcelas, y probablemente la enorme variabilidad en el rango de temperaturas producido durante un fuego no quedó fielmente reflejada midiendo solamente en tres sitios.

### Resultados de las mediciones

La evolución de los datos y los cambios estacionales nos hicieron reunir los resultados en dos grupos. Estos períodos varían algo según se consideren la conductividad y biocorrientes, o las ondas cuadradas.

A los resultados se les aplicó un análisis de varianza.

En la Tabla 6 se muestra la evolución de los daños en cada uno de los árboles quemados de la experiencia.

**TABLA 6**  
**EVOLUCION DE LOS DAÑOS EN LA PARCELA QUEMADA**

*Changes in tree damage with time after burning*

| Fecha de observación | NUMERO DE ARBOL |    |     |     |     |     |    |    |    |     |
|----------------------|-----------------|----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|-----|
|                      | 1               | 2  | 3   | 4   | 5   | 6   | 7  | 8  | 9  | 10  |
| 28-09-88             | A               | A  | B   | A   | X   | X   | A  | A  | C  | A   |
| 11-10-88             | A               | A  | B   | A   | X   | X   | A  | A  | C  | B   |
| 13-01-89             | A               | A  | B   | A   | X   | X   | A  | A  | C  | B   |
| 14-03-89             | 70              | 90 | 30  | 80  | X   | X   | 75 | 50 | 20 | 60  |
| 29-05-89             | 75              | X  | 30  | 80  | X   | X   | 75 | 50 | 20 | 85  |
| 04-07-89             | 80              | X  | 55  | 85  | X   | X   | X  | 75 | 25 | 95  |
| 07-05-90             | 80              | X  | X   | X   | X   | X   | X  | 75 | 25 | X   |
| Diámetro             | 20              | 17 | 20  | 15  | 8   | 17  | 14 | 17 | 12 | 17  |
| Altura de chamuscado | 2               | 2  | 1,5 | 1,7 | 1,3 | 1,3 | 2  | 2  | 0  | 1,5 |

X = árbol muerto.

A = 1/3 superior de la copa, verde.

B = 1/2 de la copa, verde.

C = 3/4 de la copa, verde.

La altura de chamuscado es en metros.

Las cifras representan % de acículas secas.

Los diámetros se expresan en centímetros.

### Medidas de la conductividad

Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 7.

Se puede deducir que la conductividad de los testigos tiende a aumentar en el cambio de otoño-invierno al de primavera-verano, de acuerdo con la actividad fisiológica de los árboles. Los árboles quemados tienen una conductividad menor que los testigos, efecto que se acentúa al paso del tiempo.

TABLA 7

VALORES MEDIOS DE LA CONDUCTIVIDAD EN PARCELAS DE *P. RADIATA*, TESTIGO Y QUEMADAS. VALORES EN MICROSIEMENS*Mean values of conductivity in control and burned P. radiata plots. Microsiemens values*

| TESTIGO        | A     | B     |
|----------------|-------|-------|
| Media          | 81    | 111   |
| Máximo         | 120   | 137   |
| Mínimo         | 47    | 98    |
| <b>QUEMADA</b> |       |       |
| Media          | 74    | 67    |
| Máximo         | 113   | 79    |
| Mínimo         | 42    | 57    |
| Signif.        | 0,991 | 0,999 |

A = Período del 12-09-88 al 16-01-89.

B = Período del 31-05-89 al 01-08-89.

Las mediciones de biocorrientes son algo menos indicativas que las medidas de conductividad. Los resultados obtenidos se indican en la Tabla 8.

Los árboles quemados presentan unas biocorrientes más elevadas que los testigos; efecto que se mantiene a lo largo de la experiencia. Estos resultados no son demasiado significativos, excepto la medición a 30 cm, en la primera fase de la experiencia.

TABLA 8

VALORES MEDIOS DE LAS BIOCORRIENTES EN PARCELAS DE *P. RADIATA*, TESTIGO Y QUEMADAS. VALORES EN MICROAMPERIOS*Biocurrents mean values in P. radiata control and burned plots. Microampere values*

| TESTIGO        | A     |        | B     |        |
|----------------|-------|--------|-------|--------|
|                | 30 cm | 1,30 m | 30 cm | 1,30 m |
| Media          | 5,0   | 4,0    | 10,0  | 7,4    |
| Máximo         | 8,0   | 6,8    | 20,1  | 13,9   |
| Mínimo         | 3,0   | 2,3    | 5,1   | 4,4    |
| <b>QUEMADA</b> |       |        |       |        |
| Media          | 7,8   | 5,9    | 11,7  | 9,2    |
| Máximo         | 10,0  | 6,9    | 22,9  | 16,9   |
| Mínimo         | 5,5   | 4,5    | 4,9   | 4,7    |
| Signif.        | 0,981 | 0,848  | 0,920 | 0,948  |

A = Período del 12-09-88 al 16-01-89.

B = Período del 31-05-89 al 01-08-89.

*Mediciones con ondas cuadradas*

En estas mediciones se utilizó el método de una sonda y el de tres sondas. La tensión inyectada fue de 6 voltios pp y las tensiones de salida se midieron en un osciloscopio convencional, registrando los oscilogramas cuando se consideraron de interés.

*Método de una sonda*

Las mediciones se hicieron a 50, 1.000 y 50KHz y la sonda se situó a 30 cm del suelo. Como las diferencias obtenidas en las distintas mediciones no eran muy acentuadas, no consideramos necesario agruparlas.

Los resultados correspondientes se muestran en la Tabla 9.

Los valores de los voltajes de salida se mantienen inferiores en los árboles quemados, siendo este efecto más pronunciado a 50 KHz. La relación  $V_{50}/V_{50K}$  es mayor en los árboles quemados, siendo éste un factor muy indicativo de los daños. Los valores obtenidos presentan un buen nivel de significación.

*Método con tres sondas*

Las frecuencias utilizadas fueron 50, 500, 1.000 y 50K Hz. En este método se utilizan tres sondas con dos electrodos de aguja cada una. Con una de ellas se inyecta la señal, que como en el caso anterior es de 6 voltios, y se recoge con las otras dos. Aquí los resultados se agruparon en dos. En el segundo período de medición se suprimió la medida a 500 Hz dado que sus valores eran casi idénticos a los obtenidos a 1 KHz, como se puede deducir de los datos que se presentan en la Tabla 10.

En el método de tres sondas, aplicado a árboles, una sonda se clava en el floema, a 30 cm del suelo; otra se pone, siguiendo una línea vertical, a 1 metro de ésta y, por último, la tercera se sitúa a 1 metro de la anterior, quedando las tres alineadas en un plano vertical. Una de las sondas inyecta la señal, procedente de un oscilador, y las otras dos la recogen en cada uno de los canales de un osciloscopio de doble haz.

Este dispositivo da lugar a tres tipos de medición, según la señal se inyecte en cada una de las sondas. En la Figura 1 se muestra esquemáticamente el sistema. Osc. representa la

TABLA 9

VALORES MEDIOS DE LOS VOLTAJES DE SALIDA EN LAS PARCELAS DE *P. RADIATA*, TESTIGO Y QUEMADA. METODO 1S. MEDIDAS EN VOLTIOS

*Output voltage mean values in P. radiata control and burned plots. 1S method. Measured in volts*

| TESTIGO        | T     | 50 Hz | 1 KHz | 50 KHz | $V_{50}/V_{50K}$ |
|----------------|-------|-------|-------|--------|------------------|
| Media          | 1,963 | 2,179 | 2,000 | 1,711  | 1,273            |
| Máximo         | 3,870 | 4,280 | 4,120 | 2,970  | 1,440            |
| Mínimo         | 1,200 | 1,280 | 0,800 | 0,650  | 1,060            |
| <b>QUEMADA</b> |       |       |       |        |                  |
| Media          | 1,108 | 1,265 | 1,199 | 0,862  | 1,467            |
| Máximo         | 1,470 | 1,680 | 1,520 | 1,240  | 1,860            |
| Mínimo         | 0,750 | 0,840 | 0,790 | 0,520  | 1,290            |
| Signif.        | 0,999 | 0,998 | 0,995 | 0,999  | 0,999            |

T = Media de las tres frecuencias.

TABLA 10

**VALORES MEDIOS DE LOS VOLTAJES DE SALIDA EN PARCELAS DE *P. RADIATA*,  
TESTIGO Y QUEMADA. METODO DE 3S. VALORES EN VOLTIOS**

*Output voltage mean values in P. radiata control and burned plots. 3S method. Measured in volts*

| TESTIGO        | T     | P1    | P2    | P3    | F1    | F2    | F3    | F4    | V <sub>50</sub> /V <sub>50K</sub> |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------------|
| Media          | 0,302 | 0,278 | 0,334 | 0,289 | 0,349 | 0,292 | 0,289 | 0,267 | 1,31                              |
| Máximo         | 0,386 | 0,356 | 0,470 | 0,332 | 0,440 | 0,383 | 0,382 | 0,340 | 1,40                              |
| Mínimo         | 0,259 | 0,234 | 0,233 | 0,261 | 0,304 | 0,230 | 0,229 | 0,217 | 1,26                              |
| <b>QUEMADA</b> |       |       |       |       |       |       |       |       |                                   |
| Media          | 0,358 | 0,233 | 0,439 | 0,401 | 0,445 | 0,407 | 0,398 | 0,184 | 2,53                              |
| Máximo         | 0,474 | 0,369 | 0,610 | 0,442 | 0,599 | 0,555 | 0,548 | 0,198 | 3,08                              |
| Mínimo         | 0,308 | 0,169 | 0,307 | 0,321 | 0,373 | 0,343 | 0,332 | 0,170 | 2,53                              |
| Signif.        | 0,985 | 0,816 | 0,995 | 0,988 | 0,977 | 0,988 | 0,989 | 0,968 | 0,985                             |

Período del 05-08-88 al 13-11-88.

T = Media general de las tres posiciones (o frecuencias).

P1, P2 y P3 = Medias de L1 y L2 a todas las frecuencias.

F1 = 50 Hz.

F2 = 500 Hz.

F3 = 1 KHz.

F4 = 50 KHz.

señal que se inyecta, procedente del oscilador: A es la señal que se recoge en el canal A del osciloscopio y da lugar a la lectura 1 (L1); del mismo modo, B va al correspondiente canal del osciloscopio dando lugar a la lectura 2 (L2). Como los árboles no se comportan aparentemente como isótopos al paso de las ondas, las lecturas obtenidas son diferentes, lo que ayuda en el diagnóstico de los daños.

La media general de las mediciones es mayor en los árboles quemados que en los testigos. Este resultado es opuesto al hallado con el método de una sonda. Posiblemente este efecto se deba a que con el método de una sonda la señal se inyecta y recoge en una zona dañada, mientras que con tres, esto sólo sucede en la sonda inferior. Las lecturas correspondientes a la posición 1 (en la que la señal se inyecta por una sonda en la zona dañada), son más bajas en árboles quemados que en los testigos, confirmando el efecto indicado. La señal de salida disminuye a medida que aumenta la frecuencia, lo que es normal.

La relación  $V_{50}/V_{50K}$  se mantiene alta en los árboles quemados, existiendo una diferencia mayor entre testigo y quemado que con el método 1S.

La posición 2 se muestra como la más significativa, al igual que las frecuencias F2 y F3. Es de hacer notar que el valor del voltaje de salida para F4 es menor en los árboles quemados.

Los resultados correspondientes al segundo período de mediciones se indican en la Tabla 11, en donde no se incluyen los valores de F2 por ser casi idénticos a F3. Esto produce una ligera modificación del valor de T en el testigo (de 342 pasa a 326).

La media general es menor en los árboles dañados, conservándose más altas, no obstante, las lecturas correspondientes a la posición 3. La parcela quemada presentaba la mayoría de los árboles muy dañados, estando muertos varios de ellos.

La F4 (50 KHz) se manifiesta como muy sensible a los daños, en este período, manteniéndose sus mediciones, en la parcela quemada, por debajo de los testigos, lo que le confie-

re un gran valor diagnóstico, puesto que, por lo que se ve, es independiente de la época de medición.

TABLA 11

VALORES MEDIOS DE LOS VOLTAJES DE SALIDA EN PARCELAS DE *P. RADIATA*, TESTIGO Y QUEMADA. METODO DE 3S. VALORES EN VOLTIOS

*Output voltage mean values in P. radiata control and burned plots. 3S method. Measured in volts*

| TESTIGO        | T     | P1    | P2    | P3    | F1    | F3    | F4    | V <sub>50</sub> /V <sub>50K</sub> |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-----------------------------------|
| Media          | 0,326 | 0,304 | 0,356 | 0,312 | 0,388 | 0,315 | 0,278 | 1,39                              |
| Máximo         | 0,355 | 0,377 | 0,385 | 0,373 | 0,444 | 0,340 | 0,295 | 1,52                              |
| Mínimo         | 0,302 | 0,247 | 0,305 | 0,274 | 0,336 | 0,300 | 0,265 | 1,26                              |
| <b>QUEMADA</b> |       |       |       |       |       |       |       |                                   |
| Media          | 0,269 | 0,145 | 0,265 | 0,384 | 0,346 | 0,300 | 0,145 | 2,46                              |
| Máximo         | 0,368 | 0,327 | 0,315 | 0,464 | 0,452 | 0,396 | 0,223 | 3,06                              |
| Mínimo         | 0,222 | 0,091 | 0,211 | 0,298 | 0,288 | 0,254 | 0,096 | 2,02                              |
| Signif.        | 0,989 | 0,998 | 0,996 | 0,988 | 0,983 | 0,582 | 0,999 | 0,996                             |

T = Media general de las tres posiciones o frecuencias.  
Período del 11-01-89 al 18-07-89.

Como dato interesante, hemos de indicar que dos árboles, en la parcela quemada, que habían muerto algún tiempo después de la quema, daban mediciones de conductividad, biocorriente y ondas cuadradas como si estuvieran vivos. Este efecto lo achacamos a una invasión interior de hongos, que por lisis de los tejidos adquieren características que estas mediciones parecen no discriminar.

Las posiciones de las sondas manifiestan distinta sensibilidad en la determinación de los daños, como se puede deducir de los datos que se indican en la Tabla 12.

TABLA 12

VALORES MEDIOS DE LA VARIACION DE LAS LECTURAS EN FUNCION DE LA POSICION DE LAS SONDA EN PARCELAS DE *P. RADIATA* TESTIGO Y QUEMADA. METODO DE 3S. VALORES EN VOLTIOS

*Output voltage mean values in P. radiata control and burned plots. 3S method. Measured in volts.*

| TESTIGO        | P1L1  | P1L2  | P2L1  | P2L2  | P3L1  | P3L2  |
|----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Media          | 0,366 | 0,217 | 0,354 | 0,352 | 0,228 | 0,390 |
| Máximo         | 0,442 | 0,278 | 0,503 | 0,438 | 0,278 | 0,487 |
| Mínimo         | 0,286 | 0,179 | 0,283 | 0,280 | 0,168 | 0,321 |
| <b>QUEMADA</b> |       |       |       |       |       |       |
| Media          | 0,208 | 0,182 | 0,324 | 0,334 | 0,330 | 0,440 |
| Máximo         | 0,378 | 0,361 | 0,634 | 0,586 | 0,435 | 0,513 |
| Mínimo         | 0,112 | 0,085 | 0,195 | 0,238 | 0,173 | 0,356 |
| Signif.        | 0,999 | 0,800 | 0,533 | 0,400 | 0,998 | 0,984 |

P1, P2, P3 = Inyección de la señal en la posición 1, 2 ó 3. Es la media de todas lecturas a todas las frecuencias.  
L1 = Lectura recogida en la sonda más cercana al suelo.  
L2 = Lectura recogida en la sonda que está por encima de L1.

La posición 3 se muestra como la más favorable, ya que ambas lecturas tienen buena significación. Igualmente la lectura 1 de la posición 1 también refleja adecuadamente los daños.

Las relaciones existentes entre las distintas mediciones realizadas las independizan de la época en que se mide y de los factores de variación que esto lleva aparejado.

En la Tabla 13 se presentan algunas de estas relaciones.

TABLA 13

**RELACIONES QUE SE INDICAN EN PARCELAS DE *P. RADIATA*, TESTIGO Y QUEMADA.  
METODO DE 3S**

*Output voltage ratios in P. radiata control and burned plots. 3S method*

| TESTIGO        | P2/P1 | P2/P3 | F1/F3 | F3/F4 | $\frac{P1L2}{P3L1}$ | $\frac{P1L1}{P3L2}$ |
|----------------|-------|-------|-------|-------|---------------------|---------------------|
| Media          | 1,231 | 1,161 | 1,224 | 1,107 | 0,956               | 0,916               |
| Máximo         | 1,470 | 1,410 | 1,340 | 1,150 | 1,150               | 1,120               |
| Mínimo         | 1,030 | 0,940 | 1,120 | 1,050 | 0,810               | 0,750               |
| <b>QUEMADA</b> |       |       |       |       |                     |                     |
| Media          | 1,956 | 0,855 | 1,137 | 2,135 | 0,518               | 0,439               |
| Máximo         | 2,590 | 1,380 | 1,190 | 2,820 | 0,810               | 0,850               |
| Mínimo         | 0,960 | 0,570 | 1,090 | 1,770 | 0,260               | 0,220               |
| Signif.        | 0,998 | 0,996 | 0,999 | 1,000 | 1,000               | 1,000               |

P1, P2, P3 = Media de todas las lecturas a todas las frecuencias, para cada posición.

Las diferencias de estas razones, en relación a los dos períodos de medición que se han considerado, son insignificantes, si se exceptúa P2/P3, que en la primera etapa vale 1,09 y en la segunda 0,69, en la parcela quemada.

TABLA 14

**PREDICCION DE LA MUERTE DE LOS ARBOLES QUEMADOS, EN FUNCION DE LOS  
PARAMETROS QUE SE CONSIDERAN, UN MES DESPUES DE LA QUEMA.**

**METODO DE 1S**

*Dead trees prediction from the indicated parameters, 1 month later after the burn. 1S method*

| Parámetro        | Testigo     | Quemado   | % aciertos<br>de árboles<br>muertos | % aciertos<br>de árboles<br>vivos |
|------------------|-------------|-----------|-------------------------------------|-----------------------------------|
| 1 KHz            | onda N (1)  | diferente | 71                                  | 67                                |
| 50 KHz           | onda C (2)  | onda S    | 85                                  | 67                                |
| T                | 2,3 + - 0,5 | < 1,5     | 71                                  | 67                                |
| $V_{50}/V_{50K}$ | 1,3 + - 0,2 | > 1,5     | 71                                  | 67                                |
| $V_{50}$         | 2,0 + - 0,5 | < 1,5     | 71                                  | 67                                |

(1) Una onda Tipo N es una onda cuadrada sin alterar. La onda, tipo S es una onda triangular.

(2) También puede ser E.

T = Promedio del voltaje de salida de las tres frecuencias.

Los resultados son altamente significativos, y de mantenerse en futuras experiencias, constituirían una aportación valiosa en el diagnóstico de daños por fuego.

Las mediciones realizadas un mes después de la quema son las más adecuadas para predecir la supervivencia de los árboles quemados. En la Tabla 14 se presentan estas características.

Hay que considerar que el seguimiento de 10 árboles representa una cierta limitación a la hora de establecer los parámetros anteriores. No obstante, nos permitirá, en el futuro, verificarlos empleando un conjunto mayor de árboles.

De la Tabla correspondiente a la evolución de los daños, en los árboles quemados, se deduce que, finalmente, murieron 7 y sobrevivieron 3. Aplicando los parámetros anteriores, dimos como muerto uno que sobrevivió. Tal vez sea ésta la causa del bajo porcentaje de aciertos en los árboles vivos.

## CONCLUSIONES

La medida de la conductividad discrimina bien, en términos generales, los árboles dañados de los testigos, en especial en el segundo período de seguimiento, ya que los valores mínimos de los testigos son mayores que los máximos de los quemados.

Los valores de la biocorriente son menos significativos que los de conductividad y los valores medios de los testigos quedan por debajo de los quemados a lo largo de todo el período de estudio.

El seguimiento, por ondas cuadradas, con el método de una sonda, da resultados muy significativos. Los voltajes de salida, en los árboles quemados, son inferiores a los del testigo, en los rangos de frecuencia utilizados. El valor medio de la razón  $V_{50}/V_{50K}$  se mantiene mayor en los árboles quemados, aunque la diferencia relativa es pequeña.

Con el método de tres sondas, la media general de los voltajes de salida (T) es mayor en los árboles quemados que en los testigos, durante los primeros tres meses; no obstante, el valor de P1 en los árboles quemados es inferior al de los testigos. Del mismo modo, las medidas a 50KHz también son inferiores.

La relación  $V_{50}/V_{50K}$  se mantiene, en los árboles quemados, muy por encima de la que presentan los testigos.

A partir de los primeros tres meses, la media general es menor en los árboles quemados que en los testigos. No obstante, P3 y  $V_{50}/V_{50K}$  se mantienen más elevados en los árboles quemados.

Con respecto a la posición de las sondas, P1L1 y P3L1 son las que dan los resultados más significativos.

Las distintas relaciones que se consideran, entre los valores de las mediciones con ondas, para la caracterización de los daños, son muy significativas e independientes de la época de medición.

La predicción de la muerte de los árboles se pudo realizar a partir de los datos obtenidos al mes siguiente de la quema, con el método de 1S, encontrando como más revelador el tipo de onda obtenido a 50KHz, que para los testigos y los árboles menos dañados es del tipo C y para los que van a terminar muriendo es del tipo S. También son de utilidad, en este diagnóstico, el tipo de onda a 1KHz, T,  $V_{50}/V_{50K}$  y  $V_{50}$ .

## ESTUDIO DE DAÑOS POR FUEGO CON METODOS BIOELECTRICOS

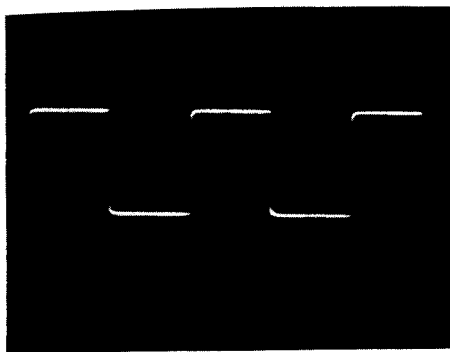


Foto 2.—Testigo. Método de 1 sonda. 1 KHz. Onda de tipo N.

Control. 1 probe method. 1 KHz. N type wave.



Foto 3.—Quemado. Método de 1 sonda. 1 KHz. Arbol n.º 3.

Burned. 1 probe method. 1 KHz. C type wave. Tree n.º 3.

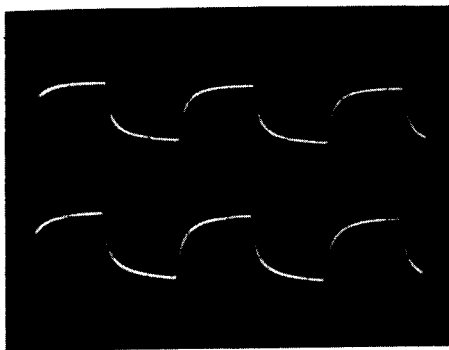


Foto 4.—Testigo. Método de 3 sondas. 50 KHz. Onda de tipo E. Posición 2.

Control. 3 probe method. 50 KHz. E type wave. Position 2.

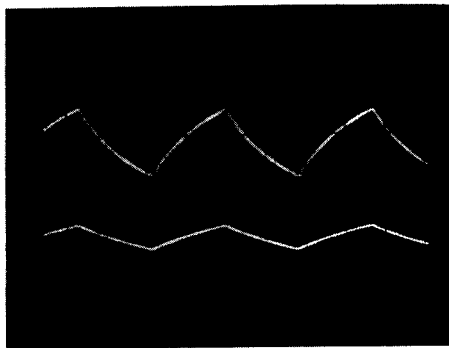


Foto 5.—Quemado. Método de 3 sondas. 50 KHz. Onda tipo S. Posición 2. Arbol n.º 4.

Burned. 3 probe method. 50 KHz. S type wave. Position 2. Tree n.º 4.

La onda superior corresponde a B ( $L_2$ ) y la inferior a A ( $L_1$ ). Fotografías obtenidas 20 días después de la quema.  
The upper wave corresponds to B ( $L_2$ ) and the lower to A ( $L_1$ ). Pictures was taken 20 days after burn.

## SUMMARY

### Study of damage produced by a wildfire in trees, by means of bioelectric methods. I. *Radiata pine*

A plot of *P. radiata* was burned in the same conditions of a summer wildfire. Close to this site was placed another plot as control.

Tree fire damage was followed by phloem conductivity measure, by biocurrents production and the use of square waves.

The conductivity permits to distinguish well among damaged trees and controls. Burned trees have a lower conductivity than controls. Biocurrent is little higher in damaged trees; nevertheless its significance is less than conductivity.

Square waves, with the 1 probe method, produce very significant results. The output voltage for damaged trees, in the range on frequencies used (50, 1K and 50KHz) is lower than in controls. The ratio  $V_{50}/V_{50K}$  is higher in burned trees.

With the 3 probe method, for the first months, the average value of output voltage is higher in burned trees, but this situation is reversed later. The ratio  $V_{50}/V_{50K}$  is higher in damaged trees, during all the trial. Several ratios among results, are proposed for damage characterization.

With the results of 1S probe measurements, obtained a month after burning, it was possible to predict the tree survival.

**KEY WORDS:** Bioelectric methods  
Conductivity  
Electrical Resistance  
Square waves  
Radiata pine  
Fire damage

## REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ALLUE J. L., 1966. Subregiones fitoclimáticas de España. IFIE. Ministerio de Agricultura.
- ANDERSON H. E., 1982. Aids to determining fuel model for estimating fire behavior. USDA. Forest Service. Intermountain Forest and Range Expt. Station. Gen Tech. Report INT-122.
- BARA S., 1986. Fertilización forestal. Xunta de Galicia.
- BARA S., ALONSO M., VEGA J. A., 1990. Métodos biofísicos para establecer el estado fisiológico de las especies forestales. Comunicaciones INIA Serie: Rec. Nat. n.º 56.
- BYRAM G. M., 1959. Combustion of forest fuels. En Forest Fires-Control and use. Chap. 3. Editada por K. P. Davis. McGraw-Hill. NY.
- CHENEY N. P., 1981. Fire behavior. En Fire and the Australian Biotca: 151-176. Gill, A. M., Groves R. M. y Noble I. R. Aust. Acad. of Science. Canberra.
- FAHANESTOCK G. R., HARE R. C., 1964. Heating of tree trunks in surface fires. J. For. 62: 799-805.
- GILL A. M., 1974. Towards on understanding of fire scar formation: Field observation and laboratory simulation. For. Sci. 20: 198-205.
- NELSON P. M., ADKINS C. W., 1986. Flame characteristics of wind-driven surface fires. Can. J. For. Res. 16: 1293-1300.
- THOMAS P. M., 1963. The size of flames from natural fires. Ninth. Sym. Int. Combust. Proc. 1962: 844-859. Academic Press, Inc. NY.
- TUNSTALL B. R., WALKER J., GILL A. M., 1976. Temperature distribution around synthetic trees during grass-fires. For. Sci. 22: 269-276.
- VAN WAGNER C. E., 1973. Heigh of crown scorch in forest fires. Can. J. For. Res. 3 (3): 373-378.
- VEGA J. A., BARA S., GIL M.ª DEL C., 1983. Prescribed burning in fire stands for fire prevention in NW of Spain: some results and effects. D.F.G. symposium «Feuerökologie». Band 4: 49-74.