

MEDICIÓN DEL CONTENIDO DE AGUA EN ÁRBOLES CON TDR: APLICACIÓN A DOS ESPECIES MEDITERRÁNEAS Y COMPARACIÓN CON EXPERIENCIAS PREVIAS

V. Hernández-Santana¹, J. Martínez-Fernández^{1,2}, C. Morán¹, A. Cano¹

¹ Departamento de Geografía. Universidad de Salamanca. Cervantes, 3. 37002. Salamanca. virhs@usal.es

² Centro Hispano Luso de Investigaciones Agrarias (CIALE). Universidad de Salamanca. c/ Curueño, s/n. 37185. Villamayor (Salamanca).

RESUMEN. Avances recientes en la utilización de TDR para medir contenido de humedad en suelos han llevado a considerar que este método podría aplicarse en otros medios porosos, como es el caso de los tejidos leñosos de los árboles. Las ecuaciones que relacionan la constante dieléctrica aparente con el contenido de humedad del suelo no son válidas para estudiar el contenido hídrico de los tejidos leñosos, tal como se ha demostrado en varias experiencias. Desde que este método se aplicara por primera vez en árboles, se han desarrollado varias ecuaciones para distintas especies. En este trabajo se presentan los resultados de la calibración y las funciones que se determinaron para dos especies de quercíneas mediterráneas, y se comparan estas funciones con las obtenidas en trabajos previos para otras especies. Se exponen los resultados del seguimiento de la humedad de estas dos especies en ejemplares vivos, utilizando las ecuaciones desarrolladas específicamente para ellas y una propuesta como universal, derivada de la combinación de los resultados de diferentes especies. Se concluye que las notables diferencias encontradas al comparar ecuaciones de distintas especies hacen necesaria la construcción de funciones para cada especie.

ABSTRACT. Recent advances in TDR use to measure soil water content have shown that this methodology can be used in other porous media, such as tree wood tissues. The equations relating the apparent dielectric constant with the soil water content have been proved not to be valid for studying wood tissue water content, as demonstrated in different experiments.. Since this method was applied for the first time in trees, different equations have been developed for different tree species. In this work, the calibration results and the functions derived for two Mediterranean oak species are shown. These functions are compared to those obtained in previous works. The results of measuring stem water content in these two species in living trees are presented, using both the equations developed specifically for them. and the one considered as universal, derived from the combination of different species results. It is concluded that the remarkable differences found comparing species specific equations make it necessary to build equations for each species.

1.- Introducción

El método *Time Domain Reflectometry (TDR)* se lleva utilizando desde hace más de dos décadas para la estimación del contenido de agua del suelo (Topp et al. 1980), y ha experimentado un notable desarrollo científico y tecnológico. El contenido hídrico del medio poroso se infiere de la constante dieléctrica del medio (K_a), estimada mediante *TDR*. El principio de esta técnica se basa en que el valor de la constante dieléctrica del agua es mucho mayor que el del aire o el del resto de los componentes del medio poroso. Estas grandes diferencias hacen que la medida de las propiedades dieléctricas de la madera, en tanto que medio poroso, constituya un modo adecuado para estimar su contenido de humedad, ya que la constante dieléctrica estará principalmente relacionada con el contenido hídrico de dicho medio poroso.

Constantz y Murphy (1990) utilizaron esta técnica por primera vez para monitorizar los cambios en el contenido de agua del tronco en varias especies forestales y observaron que la tecnología proporcionaba medidas rápidas y precisas. Comprobaron que, al igual que en el suelo, se podía establecer una relación clara y directa entre constante dieléctrica y contenido de agua de la madera. La especie que emplearon para desarrollar dicha curva fue *Pinus radiata*. Desde entonces algunos autores han utilizado esta técnica con distintos objetivos y diferentes especies. Holbrook et al. (1992) monitorizaron la variación del contenido de agua del tronco de la palmera arborescente (*Sabal palmetto*). Wullschleger et al. (1996) emplearon esta metodología para seguir los cambios estacionales del contenido hídrico en cuatro especies (*Acer rubrum*, *Quercus alba*, *Quercus prunus* y *Nyssa sylvatica*). Irvine y Grace (1997) analizaron los cambios del contenido de agua en el tronco de *Pinus sylvestris*. Kobayashi y Tanaka (2001) midieron el agua en una quercínea (*Quercus mongolia*) y una conífera (*Pinus densiflora*). Sparks et al. (2001), emplearon TDR para medir el contenido hídrico y la formación de hielo en el tronco de *Pinus contorta*. En los trabajos de Nadler et al. (2003), Nadler (2004) y más recientemente Nadler et al. (2006) se estudia la posibilidad de utilizar esta metodología para la gestión del riego en parcelas de árboles frutales (*Citrus limon*, *C. paradise*, *Mangifera indica*).

La estimación del agua del tronco constituye una manera de determinar el estado hídrico de los árboles (Constantz y

Murphy, 1990). Esta variable se ha empleado para distintas aplicaciones como la gestión del riego (Nadler et al. 2003) o para estimar con mayor exactitud la transpiración en árboles (Kobayashi y Tanaka, 2001). La técnica del TDR ofrece una serie de ventajas frente a otros métodos que se han empleado tradicionalmente para medir el contenido de humedad de los troncos de los árboles (Braekke and Kozlowski, 1975; Waring and Running, 1978). Entre las cualidades de este método se puede destacar que no es destructivo, es rápido y automatizable, no es peligroso para el usuario y las mediciones son repetibles. Wullschleger et al. (1996) propusieron la siguiente curva de calibración que podría ser considerada de utilización universal, a semejanza de lo ocurrido con los suelos (Topp et al. 1980):

$$\theta = -0.251 + 4.66 \times 10^{-2} \times K_a - 4.93 \times 10^{-4} K_a^2 \quad (1)$$

Esta ecuación se construyó con datos propios y con los resultados de la calibración realizada en el trabajo de Constantz y Murphy (1990). Esta ecuación ha sido aplicada en algunos trabajos posteriores en diferentes especies (Nadler et al. 2003; Nadler, 2004; Nadler et al. 2006). Sin embargo, debido a las pocas experiencias llevadas a cabo hasta el momento para validar la utilización del TDR con medios orgánicos, como los tejidos leñosos, se hacen necesarios más trabajos de investigación que pongan de relieve la idoneidad del método y la aplicabilidad de la ecuación propuesta como universal.

Los objetivos de este trabajo son por tanto: (i) comparar las diferentes ecuaciones de calibración con las obtenidas específicamente para las especies *Quercus pyrenaica* y *Q. rotundifolia* en trabajos anteriores, (ii) determinar la humedad del tronco de las dos especies citadas mediante el método TDR utilizando para ello las ecuaciones derivadas específicamente para ellas en trabajos previos y la propuesta como “universal”.

2.- Material y metodología

2.1. Zona de estudio

El trabajo se ha llevado a cabo en dos cuencas experimentales (C.E.) situadas en la provincia de Salamanca. La C. E. de Rinconada se localiza en la vertiente norte de la sierra de Tamames (Sistema Central), al sur de la provincia de Salamanca. Ocupa una extensión de 62 ha y su altitud oscila entre los 1140 y 1450 m. Tiene un clima de veranos cortos y no extremadamente cálidos e inviernos largos y bastante fríos. La temperatura media anual es 12.3°C y la oscilación anual es 17.3°C, siendo el mes más cálido julio (21.9°C) y el más frío enero (4.6°C). El valor de la ETo anual es de 855 mm. La precipitación media anual es 939 mm, siendo el mes más seco agosto con tan solo 15 mm y el más húmedo noviembre con 129 mm. El clima es, por tanto, de tipo mediterráneo subhúmedo. La cuenca está ocupada en un 70% por un bosque

monoespecífico denso de roble melojo (*Quercus pyrenaica* Willd.).

La C. E. de Morille tiene una superficie de 35 ha y se localiza a 14 km al sur de la ciudad de Salamanca. La altitud de la cuenca oscila entre 945 y 900 m. El 70% de la superficie está ocupada por un encinar (*Quercus rotundifolia* Lam.) heterogéneo en cuanto a la densidad del arbolado y edad de los individuos. El clima de esta cuenca es mediterráneo seco continentalizado. La temperatura media anual es de 11.2° C, siendo diciembre el mes más frío con 2.9°C y julio el más cálido con 21.1°C. La precipitación anual media se aproxima a los 500 mm, registrándose el máximo anual en el mes de diciembre con 60 mm y el mínimo en julio con 13 mm. La ETo media anual es de 1040 mm.

2.2. Proceso de calibración

Para las fases de calibración y validación del método TDR aplicado al contenido de agua en roble melojo, se taló un individuo que tenía un diámetro de tronco a DBH (*Diameter Breast Height*) de 27 cm. Se obtuvieron de ese árbol seis segmentos en total, cuatro se utilizaron para la calibración y los otros dos para verificar la bondad y la precisión de la ecuación de calibración. A los seis segmentos se les dio una forma de prisma rectangular de dimensiones aproximadas de 15 cm de largo (Fig. 1), 10 cm de ancho y 10 cm de alto, de forma que el volumen de cada muestra fue de unos 1500 cm³, aproximadamente. Con esta configuración se consiguió que la sonda de medición de humedad insertada (12 cm de longitud, varillas de 3 mm de diámetro, separación entre guías 3 cm), registrara un valor integrado del contenido de agua de un volumen asimilado a un cilindro de diámetro de 6 cm (dos veces la separación de las guías) y una longitud de 12 cm (Constantz y Murphy, 1990).

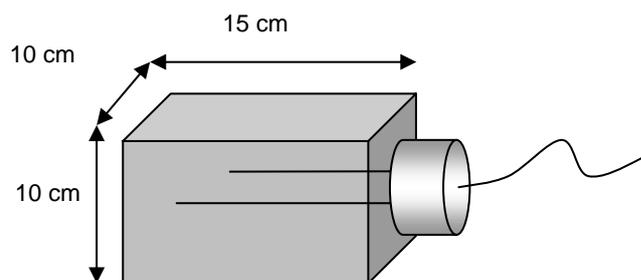


Fig. 1. Esquema de los bloques de madera y la sonda utilizados para la calibración y validación de las estimaciones del contenido de agua con TDR.

Previamente a su traslado al laboratorio, se eliminó la corteza de todos los bloques ya que se considera que no aporta humedad (Constantz y Murphy, 1990). Por lo tanto, cada muestra contenía exclusivamente albura y duramen. Debido a que la morfología radial varía incluso entre los individuos de la misma especie (Constantz y Murphy, 1990), se procuró que las muestras de *Quercus pyrenaica* tuvieran

distinto volumen de albura y duramen y así recoger mayor variabilidad de morfologías.

En cada muestra de madera, y todavía en el campo, se realizaron dos perforaciones paralelas de 12 cm de longitud a lo largo del bloque, y posteriormente se introdujeron las sondas de humedad. Las varillas de estas sondas tenían una longitud de 12 cm (Fig. 1). Se escogió esta longitud y no otra inferior porque la resolución de la señal del ecómetro empeora sensiblemente con sondas de una longitud menor de 10 cm. Guías más largas de 15 cm son difíciles de insertar debido a la resistencia producida por la fricción de la madera (Constantz y Murphy, 1990). Aún así, autores como Irvine y Grace (1997) utilizaron sondas con varillas de 2 cm y 5 cm, para la calibración, y de 5 cm para la experiencia desarrollada en el campo.

Después de cortar las muestras e insertar las sondas, se cubrieron los bloques de madera con parafina para minimizar la pérdida de agua de las superficies recién cortadas en su transporte desde el bosque al laboratorio, lo que se hizo dentro de envase isotérmico para evitar la acción biológica y la posible degradación de los tejidos (Holbrook *et al.* 1992). No obstante, el tiempo transcurrido desde la obtención de los segmentos de madera y su traslado al laboratorio fue muy reducido.

Una vez en el laboratorio se retiró la parafina y se pesó cada bloque con una balanza de precisión de $\pm 0,1$ g. Junto con cada segmento se pesó también la sonda correspondiente, cuya tara se determinó al final del proceso de secado de las muestras. A continuación se midió K_a de todos los bloques con un ecómetro modelo Tektronix 1502C (Tektronix, Beaverton, OR).

Los bloques fueron colocados en bandejas en el laboratorio y se procedió a su humectación gradual, desde su base hacia arriba por capilaridad. Además, periódicamente el nivel del agua del recipiente se subió hasta que se consiguió su saturación completa. Desde que se cortaron los bloques de madera hasta que se tomó la medida correspondiente a la saturación transcurrieron siete días. Posteriormente se procedió a eliminar gradualmente el agua, dejando que los segmentos se fueran secando al aire. De este modo las muestras leñosas fueron perdiendo el agua de forma controlada, lo que permitió conocer la mayor cantidad de datos significativos de su peso y de su constante dieléctrica, desde su saturación hasta su punto final de secado. Cada cierto tiempo, que variaba en función de la velocidad de secado de cada bloque, se determinó K_a a partir del análisis de la señal del ecómetro y se pesó cada muestra. Las medidas de los primeros siete días, dada la rapidez con la que las muestras perdían humedad, se realizaron cada 24 horas. Cuando se observó que el secado de los bloques se producía a un ritmo más lento, la determinación de K_a y del peso se fue espaciando, de forma que no se perdieran datos significativos, y que las medidas realizadas mostraran variaciones sensibles de humedad. Previamente a cada medición, los bloques se colocaron en recipientes herméticamente cerrados durante al menos 12 horas para que la humedad se distribuyese uniformemente en todo el volumen de madera (Holbrook *et al.* 1992).

Transcurridos algo más de dos meses se concluyó que los

bloques habían perdido la mayor parte de la humedad. Además, el agrietamiento consiguiente que empezó a observarse, hizo aconsejable el cese de las mediciones, ya que podría haberse convertido en una fuente de error considerable. A partir de ese momento se les retiró la sonda y se secaron en una estufa a 85°C durante 4 días para eliminar el agua por completo.

La humedad de cada muestra se determinó mediante el método gravimétrico. Es decir, a los distintos pesos de los bloques leñosos se les restó el de la muestra totalmente seca y el de la sonda. Estos valores se dividieron entre el volumen de cada bloque, medido antes de que la madera se agrietara, para obtener un valor volumétrico de la humedad. Con estos datos y los resultados de estimar K_a , se obtuvo la función de calibración. La bondad de la ecuación se verificó (fase de validación) comparando los contenidos de humedad estimados con *TDR*, con los obtenidos del análisis gravimétrico en dos bloques adicionales, no utilizados en la fase de calibración. Posteriormente se hizo otra validación de la mencionada ecuación de calibración con un segundo individuo de roble melojo. En el caso de la encina la función de calibración se construyó siguiendo el mismo procedimiento descrito.

2.3. Estimación de la humedad del roble melojo en la Cuenca Experimental de Rinconada.

Para estudiar las variaciones en el contenido de agua del tronco de esta especie se seleccionaron 4 árboles de 4 parcelas de características distintas en la Cuenca Experimental de Rinconada, teniendo por tanto 16 individuos en total. En cada parcela el estado y la edad de los robles son diferentes. Se procuró que fueran individuos cuyo diámetro (basal y *DBH*) fueran próximos al diámetro medio de cada una de las cuatro parcelas, y siempre mayor de 10 cm. En los individuos escogidos se instalaron, en junio de 2003, dos sondas en el tronco. Para ello, se realizaron perforaciones paralelas, dos a la altura correspondiente al diámetro basal (20 cm) y dos a *DBH* (120 cm). Se escogieron estas dos alturas puesto que, como es conocido, el perfil vertical de humedad de un árbol no es uniforme (Kobayashi y Tanaka, 2001). El diámetro de estos agujeros fue 3 mm y la longitud 10 ó 12 cm, dependiendo de la longitud de la sonda que se fuera a instalar (en función del diámetro de cada árbol). La separación de las perforaciones es de 3 cm, que es la distancia entre las guías de las sondas. Estas perforaciones tenían en todos los casos la misma orientación, siendo la de *DBH* y basal perpendiculares (Fig. 2) con el objeto de incluir en el análisis las variaciones producto de la variabilidad morfológica radial. Esta morfología compleja de la sección del tronco originaría una distribución radial de la humedad no uniforme por lo que es conveniente utilizar más de una sonda para obtener un conocimiento más detallado del perfil de humedad del tronco (Wullschleger *et al.* 1996, Nadler *et al.* 2003). Se retiró la corteza de la superficie del tronco donde se colocaron las sondas y se insertaron las guías.

El muestreo se realiza cada 14 días con un ecómetro Tektronix 1502C (Tektronix, Beaverton, OR). Para el análisis de los datos no se consideraron los primeros 50 días desde la instalación de las sondas ya que diversos autores han detectado evidencias de una pequeña sobreestimación del contenido de agua del tronco medida con TDR como consecuencia de la alteración que se produce durante la instalación durante los primeros días después de la inserción de las sondas en los árboles (Wullschleger et al. 1996).

Para la estimación de la humedad del tronco se emplearon la ecuación obtenida en un trabajo previo para *Quercus pyrenaica* (Hernández Santana, 2005) y la propuesta por Wullschleger et al. (1996).

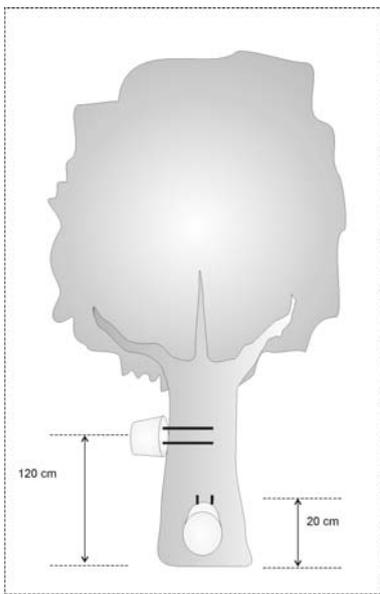


Fig. 2. Esquema de un árbol con dos sondas TDR insertadas en el tronco perpendicularmente.

2.4. Estimación de la humedad de la encina en la Cuenca Experimental de Morille.

En el caso de las encinas de la C.E. de Morille se seleccionaron un total de seis árboles para medir su contenido hídrico. En Mayo de 2005 se insertaron dos sondas de 10 cm cada una, en perforaciones previamente realizadas en el tronco a 20 cm y 120 cm. Estas perforaciones tenían todas la misma orientación, y al igual que en el caso de los melojos, se realizaron perpendiculares entre sí.

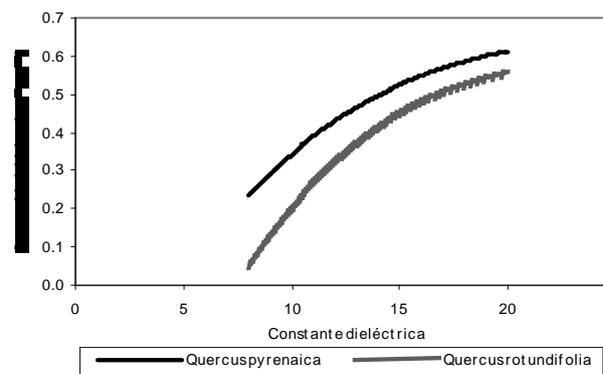
3.- Resultados

3.1. Estudio comparativo de las ecuaciones de calibración de TDR para distintas especies arbóreas.

Los resultados obtenidos durante la fase de calibración mostraron una muy buena relación entre contenido de humedad gravimétrica y mediciones de K_a en las muestras de madera de melojo y encina. La bondad de los resultados obtenidos en la fase de calibración ha sido similar (Constantz y Murphy, 1990; Sparks et al. 2001) o superior a la obtenida por otros autores (Holbrook y Sinclair 1992; Wullschleger et al. 1996). Los contenidos de humedad de las muestras empleadas para realizar la validación, medidos mediante análisis gravimétrico y los estimados con esta ecuación fueron muy similares.

Se utilizaron como estimadores de la similitud de los datos, el error medio y la raíz del error cuadrático medio. La comparación entre valores medidos y estimados confirma que el método utilizado es adecuado. El error medio (por debajo de 3% en ambas especies para todas las muestras de validación) es muy bajo y no permite detectar ningún tipo de sesgo. Los resultados de calcular la raíz del error cuadrático medio -RECM- (alrededor de 3 %) también son satisfactorios en las dos muestras.

Las ecuaciones que mejor se ajustaron ($R^2=0.96$ para roble melojo y 0.89 para la encina) a los datos experimentales de medida de la humedad tanto gravimétricamente como mediante TDR fueron polinomios de tercer grado para las dos especies (Fig. 3). Curvas polinómicas de este tipo se encuentran frecuentemente en otros materiales porosos, por ejemplo en el suelo (Topp et al. 1989). En las experiencias llevadas a cabo por otros investigadores en árboles también son varias las ecuaciones de estas características (Constantz y Murphy, 1990, Irvine y Grace, 1997). En otros casos experimentales las funciones obtenidas son polinomios de segundo grado (Holbrook et al., 1992; Wullschleger et al. 1996).



$$\theta_{Q. rot} = -0.988 + 0.1791 K_a - 0.0069 K_a^2 + 0.00009 K_a^3$$

$$\theta_{Q. pyr} = -0.45698 + 0.11666 K_a - 0.00416 K_a^2 + 0.00005 K_a^3$$

Fig. 3. Ecuaciones de calibración contenido de humedad-constante dieléctrica para las especies *Q. pyrenaica* y *Q. rotundifolia*. θ es el contenido de humedad volumétrica ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$) en el tronco y K_a constante dieléctrica.

Como se puede observar en la figura 4, las funciones de calibración obtenidas son sensiblemente distintas a las propuestas por otros autores. Comparándose estas ecuaciones de calibración con la estimada por Constantz y Murphy (1990), que fue la primera, y la de Wullschleger et al. (1996), propuesta como una ecuación válida para

cualquier especie, se observa que utilizando cualquiera de las dos curvas anteriores se infravalora el contenido de humedad para las especies objeto de estudio. Las dos ecuaciones anteriormente citadas son similares porque Wullschleger et al. (1996) combina sus datos con los obtenidos por Constantz y Murphy (1990).

Si se comparan las curvas (Fig. 4), se observa que coinciden en mayor medida en los extremos húmedo y seco y difieren de forma más notable en los valores intermedios. Esta diferencia puede ser debida al hecho de que se esté trabajando con especies distintas. Wullschleger et al. (1996) incluyen en su estudio de calibración dos especies de quercíneas (*Quercus alba* y *Q. prinus*) además de otras, pero siguen un protocolo de calibración ligeramente distinto al adoptado para *Q. pyrenaica* y *Q. rotundifolia*. Aunque la ecuación obtenida para la encina se acerca más a la obtenida por Wullschleger et al. (1996), parece que estima el contenido de humedad del tronco con menos precisión.

Hasta la fecha, las ecuaciones de calibración obtenidas para distintas especies de árboles son todas diferentes unas de otras. Teniendo todo esto en cuenta, el establecimiento de una ecuación universal para la madera, como es el caso de los suelos, parece complicado. Topp et al. (1980) desarrolló una ecuación universal para los suelos, con muy pocas excepciones, utilizando una gran variedad de tipos de suelos. Hasta el momento, debido a las pocas especies de árboles estudiadas, el establecimiento de una ecuación similar en cuanto a su función para los árboles no parece fácil. A tenor de los resultados obtenidos para las especies de quercíneas estudiadas, parece que se obtendrían resultados más precisos en la medida del contenido de agua del tronco mediante TDR desarrollando ecuaciones específicas para cada especie.

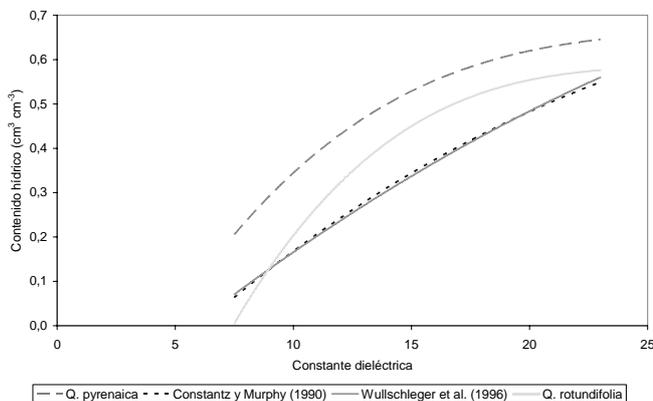


Fig. 4. Comparación de las ecuaciones de calibración obtenidas para las quercíneas objeto de estudio y las propuestas por otros autores.

3.2. Medición de la humedad del tronco del roble melojo y la encina con ecuaciones específicas y la comparación con las propuestas anteriores

Tal y como se observa en las figuras 5 a y 5 b la evolución

del contenido hídrico de ambas especies, estimado con la ecuación propuesta como universal y con las funciones calculadas específicamente para cada una de las especies, es notablemente distinta. Como se aprecia en ambos casos la humedad de los árboles se infraestima cuando se utiliza la ecuación derivada por Wullschleger et al. (1996), como se sugirió en el anterior apartado. En los valores extremos de humedad, especialmente en los máximos, las diferencias al emplear una u otra ecuación se reducen. En el caso de la encina las variaciones de contenido de agua del tronco en valores altos, estimadas con una y otra ecuación son menos acusadas que en el roble melojo.

Otro punto destacable es que la variación total del contenido hídrico es mucho mayor si se utiliza la ecuación considerada universal que si se emplean las ecuaciones derivadas para cada una de las dos especies estudiadas.

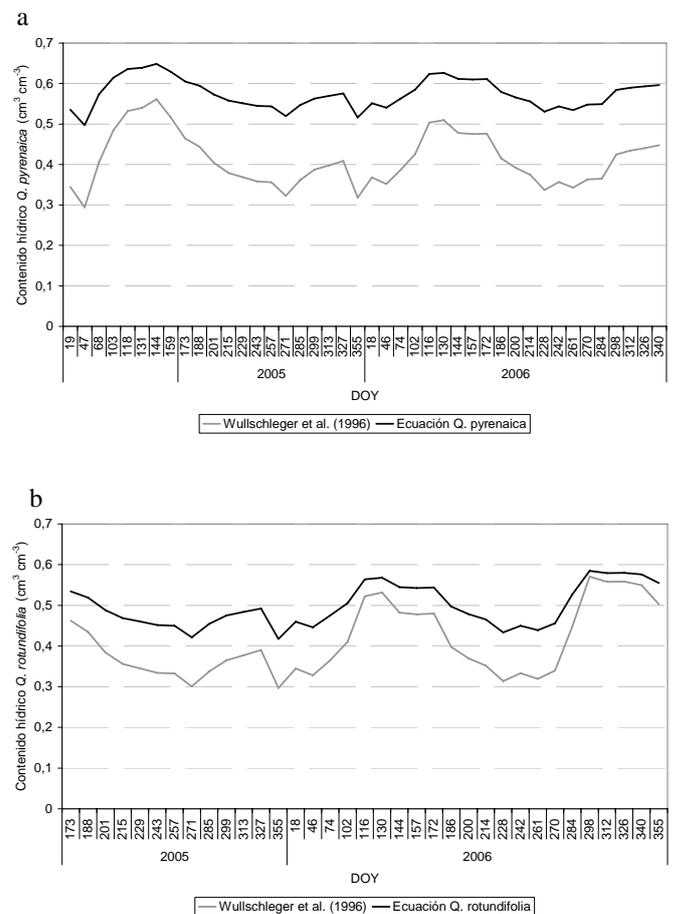


Fig. 5. Evolución del contenido hídrico del tronco del roble melojo (a), y de la encina (b) utilizando las ecuaciones calculadas para estas especies y la propuesta como universal.

En el caso del roble melojo la variación máxima de contenido hídrico del tronco para los años 2005 y 2006 se encuentra alrededor del 20%, mientras que ascendería hasta un 43% en caso de que se aplicara la ecuación de Wullschleger et al. (1996). La diferencia de la cantidad de agua detectada en el tronco de la encina experimenta un

aumento del 28% al 47% en caso de que se utilizara la función específica de la encina o la universal respectivamente. La diferencia de contenido hídrico que Wullschleger et al. (1996) midió para dos especies distintas de quercíneas con esta metodología, está alrededor del 20%, variación similar a la encontrada cuando se utilizan las funciones específicas y no la universal. Sin embargo, en otras experiencias llevadas a cabo con especies de quercíneas (Constantz y Murphy, 1990) las variaciones de humedad que se registraron a lo largo de dos años de mediciones fueron en algunos casos del 40%.

4.- Conclusiones

La metodología TDR ofrece una serie de ventajas frente a otros métodos que se han empleado tradicionalmente para medir el contenido de humedad de los troncos de los árboles. Entre las cualidades de este método se puede destacar que no es destructivo, es rápido y automatizable, y las mediciones son repetibles.

Aunque es una técnica muy empleada en la estimación del contenido de agua en los suelos, para la medición del contenido hídrico de los árboles aún se debe avanzar más. Como se ha puesto en evidencia en este trabajo, cada especie de árbol podría necesitar una ecuación propia. Aunque las funciones calculadas hasta ahora son similares en cuanto a la forma, parece que la propuesta de que se aplique una sola ecuación a todas las especies debe ser tomada con precaución.

La consecuencia más destacable de los resultados de este análisis es la constatación de que las funciones de calibración obtenidas son sensiblemente distintas a las propuestas por otros autores para otras especies. Comparándose estas ecuaciones con la de Wullschleger et al. (1996), propuesta como una ecuación válida para cualquier especie, se observa que se infravalora el contenido de humedad para ambas especies. Además, la variación de contenido de humedad del tronco calculada con la ecuación considerada universal es demasiado acusada, tratándose de árboles. Aunque la obtención de una única ecuación para aplicar esta metodología en cualquier especie sería muy útil, se necesita avanzar más en la investigación en este campo. En el futuro se debería aplicar esta metodología a más especies e investigar como afecta la estructura y la composición de la madera en las mediciones para determinar si finalmente es posible calcular una ecuación de calibración válida para cualquier especie de árbol o por si el contrario es necesario construir funciones de calibración para cada especie en la que se quiera aplicar la metodología TDR.

El desarrollo de esta técnica empleada en árboles tendría diversas aplicaciones en diferentes ámbitos como la hidrología, la fisiología vegetal o la agronomía entre otros.

Agradecimientos. Los autores quieren expresar su agradecimiento al Ministerio de Medio Ambiente (Proyecto RESEL) y al Ministerio de Ciencia y Tecnología (Proyecto REN2003-00381), sin cuya financiación no habría sido posible la realización de este trabajo, y a dos revisores anónimos que han contribuido a mejorar la calidad del trabajo.

Bibliografía

- Braekke, F.H., Kozlowski, T.T. 1975. Shrinkage and swelling of stems of *Pinus resinosa* and *Betula papyrifera* in Northern Wisconsin. *Plant and Soil*, 43: 387-410
- Constantz, J. y Murphy, F. 1990: Monitoring storage moisture in tree using time domain reflectometry *J. Hydrol.*, 119: 31-42
- Hernández Santana, V. 2005: Estimación del contenido de agua en árboles mediante TDR par el estudio del estrés hídrico: aplicación a *Quercus pyrenaica* Willd. Tesis de Licenciatura. Universidad de Salamanca. Salamanca. 86 pp.
- Holbrook, N.M., Burns, M.J. y Sinclair, T.R. 1992: Frequency and Time-Domain Dielectric measurements of stem water content in the arborescent palm, *Sabal palmetto* *J. Exp. Bot.*, 43: 111-119
- Irvine, J. y Grace, J. 1997: Non destructive measurement of stem water content by time domain reflectometry using short probes *J. Exp. Bot.*, 48: 813-818
- Kobayashi, Y. y Tanaka, T. 2001: Water flow and hydraulic characteristics of japanese red pine and oak trees *Hydrol. Process.*, 15: 1731-1750
- Nadler, A. 2004: Relations between soil and tree stem water content and bulk electrical conductivity under salinizing irrigation *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 68: 779-783
- Nadler, A., Raveh, E., Yermiyahu, U., y Green, S.R. 2003: Evaluation of TDR use to monitor water content in stem of lemon trees and soil and their response to water stress *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 67: 437-488
- Nadler, A., Raveh, E., Yermiyahu, U., y Green, S. 2006: Stress induced water content variations in mango stem by time domain reflectometry *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70: 510-520
- Sparks, J.P., Campbell, G.S. y Black, R.A. 2001: Water content, hydraulic conductivity, and ice formation in winter status of *Pinus contorta*: a TDR case study *Oecologia*, 127: 468-475
- Topp, G.C., Davis, J.L. y Anan, A.P. 1980: Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines *Water Resour. Res.*, 16: 574-582
- Waring, R.H., Running, S.W. 1978. Sapwood water storage: its contribution to transpiration and effect upon water conductance through the stems of old-growth Douglas-fir. *Plant, Cell, Environ.*, 1: 131-140
- Wullschleger, S.D., Hanson, P.J. y Todd, D.E. 1996: Measuring stem water content in four deciduous hardwood with a time domain reflectometry *Tree Physiol.*, 16: 809-815