



**6º CONGRESO FORESTAL  
ESPAÑOL**

---

**6CFE01-529**

---

Montes: Servicios y desarrollo rural  
10-14 junio 2013  
Vitoria-Gasteiz



---

Edita: Sociedad Española de Ciencias Forestales  
Vitoria-Gasteiz, 10-14 junio de 2013  
ISBN: 978-84-937964-9-5  
© Sociedad Española de Ciencias Forestales

## **Estimación de la humedad de biocombustibles sólidos mediante tablas de densidad aparente y humidímetros**

LÓPEZ VICENS, I.<sup>1</sup>, GASPÀ COMPANY, I.<sup>1</sup>, CODINA I PALOU, M.<sup>1</sup> y NAVARRO I MAROTO, P.J.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Área de Aprovechamientos Madereros y Biomasa, Centro Tecnológico Forestal de Catalunya

### **Resumen**

El contenido de humedad se considera el parámetro de calidad más importante para los biocombustibles sólidos, pero su determinación mediante el método normalizado (diferencia de peso por secado en estufa) consume tiempo y mano de obra. Por estas razones los dispositivos de humedad pueden ser un medio práctico para muchos empresarios para evaluar rápidamente el contenido de humedad de las astillas de madera. El objetivo de este estudio es evaluar dos métodos de cálculo para poder realizar estimaciones rápidas: 1) tablas de densidad aparente – humedad, y 2) humidímetros comerciales. Para ello se ha calculado la densidad aparente, humedad y granulometría, siguiendo métodos normalizados, de la astilla comercializada por una empresa concreta, así como los costes asociados al control. Los resultados muestran que el error incurrido al estimar la humedad mediante tablas de densidad aparente es inferior al incurrido con los humidímetros, situándose en +/- 1,4 unidades porcentuales de humedad. Los dos métodos rápidos requieren de una inversión inicial asociada a la adquisición de los aparatos y de su control y calibración. Así, a medio plazo, pueden constituirse en una alternativa económica a ciertos controles normalizados de humedad donde no sea necesaria una precisión elevada.

### **Palabras clave**

Biomasa forestal, astilla, comercio de biocombustibles, peso, coste control de calidad.

### **1. Introducción**

Poder vender astilla de madera con uso energético al precio justo en relación a la energía que aporta es un primer paso para mejorar la eficiencia económica de su cadena de suministro. Para ello es necesario calcular o estimar la humedad del lote suministrado. El método de referencia consiste en muestrear el lote y generar una muestra que se enviará a un laboratorio, que tardará por lo menos un día en proporcionar los resultados.

Así pues, desde hace años, existen empresas de ingeniería que desarrollan y comercializan instrumentos de medición rápida de la humedad. Dichos aparatos se basan en las propiedades eléctricas, ópticas o de otra índole, de la madera y el agua que contiene (NYSTRÖM & DAHLQUIST, 2004; JENSEN, P.D. et al, 2006).

En otros casos, se ha estudiado, como alternativa al secado en estufa, el uso de horno microondas para el secado (CAVALLI & BENVENUTTI, 1999), método inicialmente estudiado para madera sin astillar y que posteriormente ha sido estudiado en Italia de nuevo para astilla (PONZA, 2010).

El presente estudio se ha centrado en la densidad aparente como estimador de la humedad, mediante el ajuste de una ecuación (curva o tabla) que relacione ambas variables. No se han encontrado estudios previos similares a éste, aunque existe un buen trabajo realizado en el marco del proyecto pre-normativo *BioNorm* (HARTMANN, H. et al, 2004) y otros trabajos no publicados (en Irlanda por KENT, T. del Instituto Tecnológico de Waterford y en Letonia por BUMANIS, K. del Instituto de Investigación y Desarrollo Forestal y de la Madera de Jelgava) a los que no se ha podido acceder. Por otro lado, la única *review* existente sobre el tema (NYSTRÖM & DAHLQUIST, 2004) hasta la fecha, se refiere a métodos para instalaciones industriales o plantas de generación de electricidad.

## 2. Objetivos

El objetivo general de este estudio ha sido la valoración de métodos para la estimación rápida de la humedad con márgenes razonables de error, inferior al 5% unidades porcentuales de humedad, y de bajo coste. Ello siempre teniendo en cuenta que se trata de métodos que no sustituyen al método de referencia de secado en estufa sino que lo que se pretende con ellos es facilitar y mejorar las transacciones económicas entre operadores de biomasa sólida.

El objetivo específico del presente estudio ha consistido en contrastar los errores asociados al uso de tres métodos de estimación de la humedad, con especial énfasis en la densidad aparente, en unas condiciones controladas, es decir, con un tipo concreto de astilla donde la mezcla de especies y el proceso productivo no se varían. Así, en este caso concreto se trata de una mezcla indeterminada de *Pinus nigra* y *Pinus sylvestris* producida mediante una astilladora de tambor de dos cuchillas, cribada y almacenada en pilas. Los resultados de estudios como éste permiten establecer qué esfuerzo debe llevar a cabo el productor de astilla para ajustar y calibrar dichos métodos de cálculo rápido de la humedad.

## 3. Metodología

### Aparatos

Los aparatos para la medición instantánea de la humedad utilizados en el presente estudio han sido el BLL de la empresa *Schaller GmbH*, consistente en una lanza que en su extremo distal tiene un engrosamiento donde se realiza la medición. En el otro extremo se dispone la pantalla de lectura. Dispone de tres calibraciones según el tipo granulométrico de astilla: “Astilla”, “Astilla gruesa” y “Astilla industrial”. El principio de medida se basa en la resistividad eléctrica. Las mediciones del aparato se han ajustado en fábrica con astillas sometidas al procedimiento normalizado para la determinación de la densidad aparente (UNE-EN 15103, AENOR 2009). El coste del aparato ronda los 750 euros.

El segundo aparato utilizado ha sido el BM1, fabricado por la misma empresa y propiedad de la cooperativa productora de astilla forestal *Productes Forestals de la Catalunya Central SCCL*. Consiste en un recipiente con una capacidad mínima de 12 litros, que dispone de dos asas y una pantalla de lectura. Dispone también de varias calibraciones, que se deben escoger en función del tipo de astilla y del peso de depositado en el recipiente, para lo cual se debe retirar o añadir astilla de tal modo que se ajuste a los 2,4, 2,8, 3,5 ó 4.5 kilogramos para los cuales se han ajustado las calibraciones en fábrica. Las calibraciones utilizadas en el presente estudio han sido: “Astilla”, “Astilla gruesa”, “Astilla industrial” y “P100”. El principio de medida es la permitividad de la astilla, basado en sus propiedades dieléctricas

bajo un campo eléctrico variable de frecuencia inferior a 0,3 GHz (JENSEN, P.D. et al., 2006). El coste del aparato se sitúa en torno a los 1.700 euros.

#### Muestreo y medidas

La recogida de muestras se ha realizado en la propia planta de producción de astilla de la empresa Apensol S.L, situada en T.M. de Olius (E382545, N4650778, UTM31N ETRS89) provincia de Lleida, una zona del pre-Pirineo Central y de orientación sur. El tipo de astilla ha sido siempre el mismo y es el habitualmente comercializado por la empresa. El astillado se realiza mediante una astilladora de tambor, manufacturada por Bruks, con dos únicas cuchillas que cubren todo el ancho de entrada. La astilladora montada en autocargador Volvo con contenedor volquete de 15 metros cúbicos. Dicha astilla se somete a un cribado de tambor con costillas interiores y con luces de 10 mm y 35 mm, que produce típicamente un tipo granulométrico P45 según la norma EN 14961-4 y G50 según la norma ÖNORM M7133, actualmente sin vigencia legal. Las pilas muestreadas están compuestas por astilla de tronco con corteza, principalmente de *Pinus nigra* y en mezcla indeterminada con *Pinus sylvestris*. El muestreo se ha realizado en tres tandas de diez muestras, cada tanda separada un tiempo mínimo de una semana no habiendo, además, ningún tipo de reemplazo.

En el muestreo se ha procedido de la siguiente manera (ver figura 1): se llena de astilla un cubo normalizado de 50 litros, y se procede a la determinación de la densidad aparente según la norma UNE-EN 15103. Seguidamente se procede a la medición con el aparato BLL mediante su clavado en las astillas que se encuentran en el cubo, anotando las tres lecturas de la humedad de que dispone. Entonces se procede a realizar dos divisiones de la muestra de astilla mediante el uso de una caja con ranuras diseñada para su uso con biomasa astillada. En cada división, se rechaza una mitad y se guarda una mitad. La mitad guardada de la segunda división se utiliza para la estimación de la humedad con el aparato BM1, ajustando el peso y anotando las cuatro lecturas de que dispone para astilla. A continuación con esta misma astilla se realiza una tercera división de la muestra, rechazando una mitad y guardando una mitad. Finalmente, se vuelve a dividir la muestra, guardando las dos mitades en bolsas para realizar en cada una de ellas, por separado, la determinación de la humedad de referencia por el método gravimétrico de secado en estufa. La humedad de referencia correspondiente a cada muestreo se calcula como la media de las humedades de las dos muestras. Este procedimiento se realiza diez veces por cada tanda.

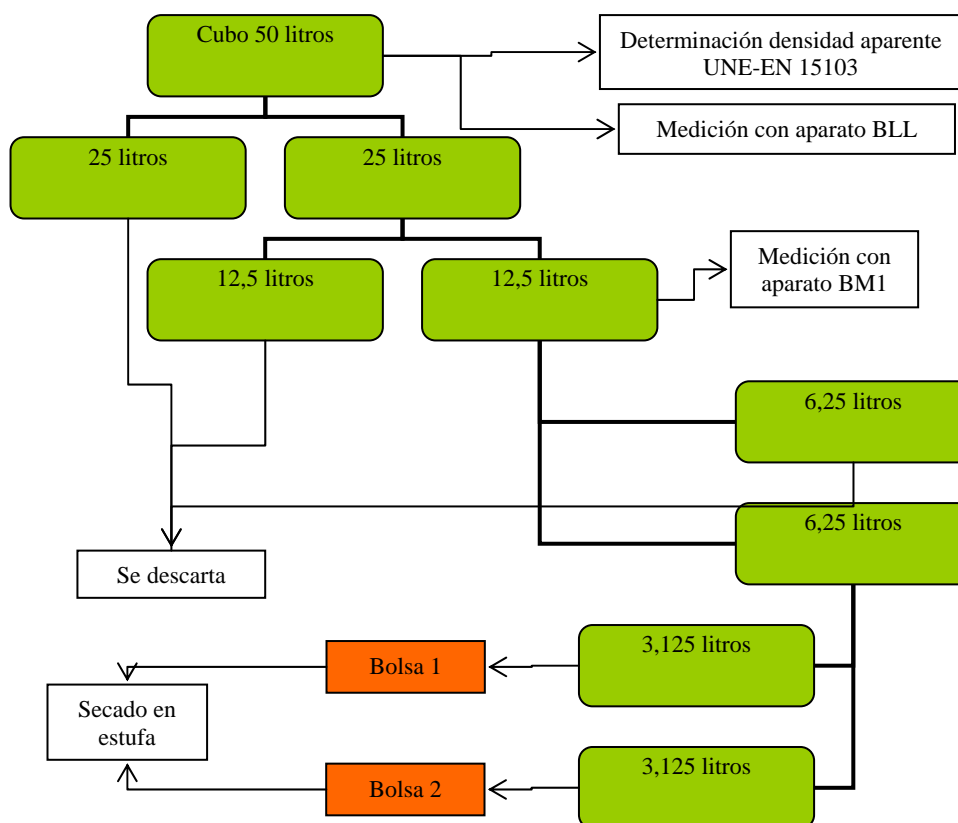


Figura 1. Procedimiento seguido en cada muestreo

Con el fin de comprobar que todas las mediciones realizadas tanto con los aparatos como mediante la densidad aparente, se hayan realizado sobre muestras de astilla homogéneas, se ha procedido a realizar un análisis de la distribución de partículas. Para ello se ha mezclado, por tanda, el contenido de tres bolsas elegidas al azar cuidando que no se incluyan bolsas correspondientes al mismo muestreo, y se ha procedido a su tamizado. El equipo de tamizado es un tamiz oscilatorio Retsch AS-400, con tamices de la misma empresa y luces de 63 mm, 45 mm, 31,5 mm, 16 mm, 11,2 mm, 8 mm, 5,6 mm, 3,15 mm, 2,8 mm y 1 mm.

#### Determinación de la humedad mediante secado en estufa

La humedad de referencia se ha calculado mediante el secado en estufa durante un tiempo mínimo de dieciséis horas a  $105\pm 2^{\circ}\text{C}$ , hasta que la muestra alcanza un peso constante, entendido éste como una variación inferior al 0,2% del peso de la muestra entre dos pesadas consecutivas espaciadas por un tiempo de una hora. A lo largo del presente artículo, la humedad está referida en base húmeda, ya que es la base de mayor utilización en el sector bioenergético.

#### Costes de la estimación rápida de la humedad

Además de contar con los precios de los aparatos de medición, se ha procedido a estimar el tiempo destinado al muestreo de cara a contrastar no sólo los resultados estadísticos de los diferentes métodos, sino también los costes asociados. También se ha estimado en 15 euros el coste del envío de muestras a laboratorio.

El coste, para un empresario, de cada análisis de humedad se establece en 25 euros por muestra, mientras que para la caja con ranuras y cubo normalizado se establece un precio de 300 euros y de 100 euros respectivamente. También es necesaria una balanza de campo de coste aproximado de 250 euros. El coste horario del personal se establece en 20 euros/hora para las subcontratas y en 12 euros/hora para personal propio. El gasto en desplazamiento de un equipo subcontratado para la realización del muestreo se establece en 260 euros por tanda.

#### Análisis

Los pares de valores humedad – densidad aparente se ha procedido a ajustarlos a ecuaciones que permitan la confección de ecuaciones “densidad aparente – humedad”. Las ecuaciones ensayadas para el ajuste han sido:

- $a + b \cdot BD$
- $a + b \cdot BD + c \cdot BD^2$
- $a + b \cdot \ln(BD)$

donde:

BD es la densidad aparente o a granel de la astilla medida en  $t/m^3$  aparente  
a, b y c, representan los parámetros ajustados

Para la comparación de todos los métodos de estimación de la humedad, se ha realizado un test de muestras pareadas.

#### 4. Resultados

Para comenzar, con objeto de justificar todos los resultados posteriores, en la tabla 1 se muestran los resultados del tamizado donde, por tandas, se muestra el porcentaje total de la muestra cribada que ha sido retenido por cada tamiz.

Tabla 1. Porcentajes retenidos en cada tamiz, por tanda

Tanda	45 mm	31,5 mm	16 mm	11,2 mm	8 mm	5,6 mm	3,15 mm	2,8 mm	1 mm	Tamiz base 0 mm
Tanda 1	0,00	0,88	51,77	25,39	13,53	5,96	1,69	0,07	0,24	0,47
Tanda 2	0,00	0,87	48,57	25,42	15,01	7,03	2,24	0,09	0,27	0,49
Tanda 3	0,16	0,20	44,49	27,68	17,98	6,84	1,80	0,07	0,28	0,50

Los pares de valores densidad aparente – humedad se han representando en la figura 2, donde, además, también se resalta el único valor atípico encontrado. Para dicha distribución, el mejor ajuste para los valores de humedad superior al 30% resulta de una curva de la forma cuadrática

$$\%H = -47,39 + 417,13 \cdot BD - 394,34 \cdot BD^2$$

ya que su  $R^2$  resulta ser de 0,988 frente al 0,987 del ajuste logarítmico, estando la ecuación lineal descartada desde un primer momento en este caso. El test de bondad de ajuste a una distribución normal de los residuos de dicha ecuación proporciona un valor P (Shapiro-Wilk W test) de 0,5885.

En cambio, para los valores de humedad inferiores al 30%, de los cuales sólo se dispone de cuatro datos, se ha ajustado mejor una ecuación de la forma logarítmica

$$\%H = 190,03 + 113,07 \cdot \ln(BD)$$

con  $R^2$  de 0,991 frente a un 0,989 de la ecuación lineal. La ecuación cuadrática, aun teniendo un  $R^2$  mayor, 0,994, se descarta por causa de los estadísticos de los coeficientes.

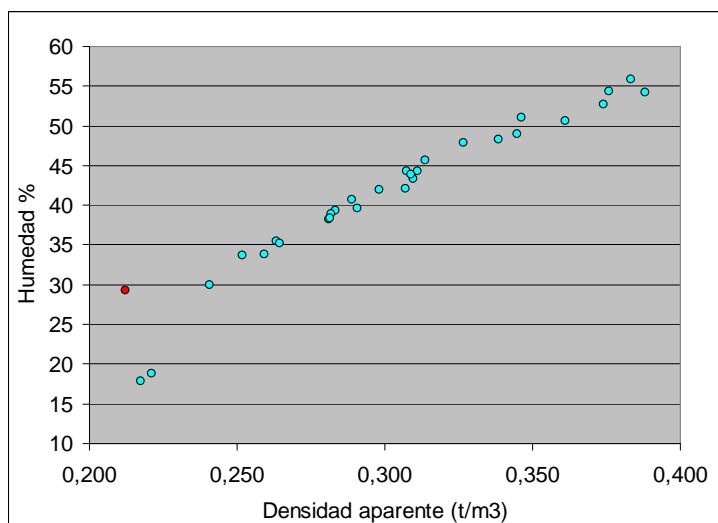


Figura 2. Gráfico de los valores de densidad aparente y humedad de las treinta muestras. El círculo marcado en rojo representa un valor atípico, excluido de los ajustes.

En la tabla 2 se muestran los resultados de los tests de muestras pareadas de ambas curvas juntamente con los correspondientes de los humidímetros comerciales. El sesgo en este estudio se corresponde con la diferencia valor calculado – valor de referencia. El valor de la amplitud se ha calculado mediante la diferencia entre el límite superior del sesgo y el inferior, al 95% de confianza, calculados por el test. La figura 3 muestra los valores estimados con los tres métodos mencionados para la tabla 2 (mostrando sólo los valores de las calibraciones de menor sesgo de los humidímetros) frente a los valores de referencia calculados por secado en estufa.

Tabla 2. Resultados de los tests de muestras pareadas realizados sobre las estimaciones con las ecuaciones de densidad aparente y sobre los resultados de los aparatos de medición de humedad

Método	Sesgo	Amplitud del sesgo	t-ratio	Prob >  t	N
Ec. densidad aparente > 30%	$9,3 \cdot 10^{-15}$	0,598	$6,42 \cdot 10^{-14}$	1	27
Ec. densidad aparente < 30%	$-2,5 \cdot 10^{-07}$	2,409	$-6,72 \cdot 10^{-07}$	1	4
BLL – Astilla	-8,068	4,083	-8,124	<0,0001	27
BLL – Gruesa	-0,725	3,234	-0,9216	0,3652	27
BLL – Industrial	8,905	3,838	9,538	<0,0001	27
BM1 – Astilla	-11,364	3,193	-14,633	<0,0001	27
BM1 – Gruesa	-7,715	3,353	-9,479	<0,0001	26
BM1 – Industrial	-3,119	4,060	-3,164	0,0041	26
BM1 – P100	3,595	6,415	2,421	0,0308	14

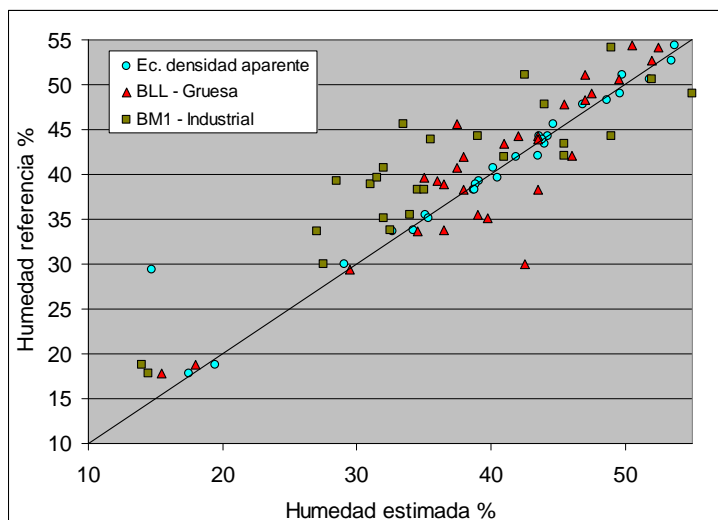


Figura 3. Gráfico de valores de humedad estimados mediante ecuación de densidad aparente y con aparatos de medición en sus calibraciones con menor sesgo, frente a los valores de humedad de referencia

Los tiempos de realización del muestreo por dos personas se han estimado en los siguientes valores:

- montaje in situ de los materiales y toma de decisiones: 20 minutos
- muestreo completo con dos bolsas listas para envío a laboratorio: 12 minutos
  - o muestreo sólo densidad aparente: 9 minutos
- desmontaje materiales: 10 minutos

Así, los costes asociados a la estimación de la humedad son los que se muestran en la tabla 3 juntamente con los valores del sesgo obtenidos en este estudio. La inversión correspondiente al aparato BM1 incluye, además, la adquisición de una balanza. La inversión correspondiente a la propia realización de curvas de calibración se corresponde con un divisor de muestras, un cubo de 50 litros normalizado y una balanza. En cuanto a los costes de ajuste y calibración, se consideran iguales para los tres tipos, en caso que sea la empresa la que realiza la inversión, ya que, en todo caso, una empresa debe realizar un estudio sobre los aparatos de medición de astilla a fin de determinar qué curva se ajusta mejor a su astilla. La subcontrata supone el gasto necesario para contratar a un equipo que realiza el muestreo y los ajustes.

Tabla 3. Estimación de costes asociados a la disposición de un método rápido de estimación de la humedad, y su sesgo asociado para el presente estudio

Método	Sesgo mínimo (% humedad)	Inversión (EUR)	Coste ajustes y calibración (EUR)
Confección de una tabla de densidad aparente (costes propios)	$9,3 \cdot 10^{-15}$	650	1155
Confección de una tabla de densidad aparente (subcontrata)	$9,3 \cdot 10^{-15}$	350	2175
Aparato BLL	-0,725	750	1155
Aparato BM1	-3,119	1950	1155



## 5. Discusión

Los valores y la gráfica de distribución de partículas de las diferentes tandas de muestreo, aunque no han podido ser analizados estadísticamente, muestran que el tipo de astilla se ha mantenido homogéneo de tanda en tanda y, por lo tanto, los resultados de todos los muestreos se pueden considerar no influidos por variaciones en el tipo de astilla.

Con respecto a la estimación de la humedad, el mejor resultado se obtiene en el rango del 30 al 50% de humedad con la ecuación ajustada con la densidad aparente. Al haber sido ajustada con los mismos datos con que se ha realizado el test de muestras pareadas, éste muestra lógicamente un sesgo muy bajo (tabla 2). Para valores de humedad inferiores al 30%, la escasez de datos recogidos en este rango no permite un ajuste que pueda ser valorado con suficiencia, a pesar de que finalmente se ha ajustado una ecuación logarítmica.

Para la ecuación ajustada para valores de humedad por encima del 30%, la observación de los residuos de la estimación de la humedad en función de la densidad aparente y de sus valores absolutos no revela ninguna correlación. Por ello, a la hora de dar márgenes de error, se propone optar por los valores de los percentiles 2,5% y 97,5% (total 95%) de una distribución normal ajustada a los residuos. De esta manera, el margen inferior sería -1,40 y el superior 1,34, respecto al valor obtenido por dicha ecuación, todos ellos en unidades porcentuales de humedad en base húmeda. En el caso de la ecuación ajustada para humedades inferiores al 30%, la escasez de datos no permite realizar una estimación fiable de los límites.

Aparte de por la humedad, la densidad aparente está también determinada por la especie (densidad de la madera) y la granulometría (grado de apilamiento) que a su vez viene determinada también por la especie y el proceso de producción, principalmente. Por ello, en este estudio se han mantenido constantes estos dos aspectos, ya que de otro modo las mediciones pueden llevar a resultados desalentadores, del mismo modo que el uso de una ecuación debe evitarse para otras especies o procesos de producción. Un ejemplo de dicha variación se puede encontrar en la tabla 4, donde se muestran los resultados del estudio conjuntamente con los que se disponen en la norma UNE-EN 14961-4 (AENOR, 2012).

*Tabla 4. Rangos de densidad aparente para diferentes rangos de humedad, de acuerdo con la ecuación ajustada en este estudio y con el ejemplo que muestra la norma UNE-EN 14961-4. Valor de densidad aparente en t/m<sup>3</sup> aparente*

<b>Humedad % base húmeda</b>	<b>8 a 18</b>	<b>18 a 25</b>	<b>25 a 35</b>	<b>35 a 45</b>
<b>Fuente</b>				
<b>UNE-EN 14961-4 Coníferas</b>	0,160 a 0,180	0,180 a 0,200	0,200 a 0,225	0,225 a 0,270
<b>UNE-EN 14961-4 Frondosas</b>	0,225 a 0,250	0,250 a 0,280	0,280 a 0,320	0,320 a 0,380
<b>Ecuación elaborada</b>	-	0,220 a 0,235	0,235 a 0,265	0,265 a 0,320

También es conveniente mencionar que los valores densidad aparente podrían ser calculados mediante el peso neto de una carga en un camión, dividiendo este valor entre el volumen aparente cargado en el contenedor al finalizar el trayecto. Los valores de densidad aparente así obtenidos pueden estar sujetos a una gran variabilidad, debida a las condiciones de transporte y las de medición del volumen de una carga que suele tener una distribución

heterogénea. Por ello puede ser recomendable limitarse a su cálculo mediante el método normalizado.

En lo que respecta al uso de los aparatos de estimación, los resultados obtenidos parecen ir en línea con resultados anteriores (LÓPEZ, 2012), en donde incluso la curva de calibración que mejor se ajusta a los valores reales presenta un cierto sesgo y una gran dispersión. En el estudio mencionado, el sesgo más bajo obtenido con el aparato BLL, curva “industrial”, es de 0,4 (sobreestimación) y para el BM1 de -2,3 (subestimación) para la curva “grueso”. En el caso del presente estudio, las curvas de calibración que mejor se ajustan a la astilla estudiada son la “gruesa” para el aparato BLL y la “industrial” para el aparato BM1, subestimando en 0,7 y 3,1 unidades porcentuales de humedad, respectivamente. Por otro lado, se observan algunas tendencias de error correlativas con la humedad: el BM1 tiende a subestimar en humedades de referencia inferiores al 40%, y el BLL tiende a presentar también subestimaciones en las lecturas a partir del 45% de humedad de referencia (ver figura 3).

En la figura 3 se observa además una gran dispersión en las estimaciones con los aparatos, que queda reflejada también en los rangos de la estimación de la media al 95% que se han presentado en la tabla 2, siendo en todos los casos superior a 3 unidades porcentuales de humedad. Dichos aparatos se han diseñado y calibrado para muestras de astilla producida en el Centro de Europa, y es probable que los resultados se puedan mejorar mediante una calibración con las biomásas ibéricas. Los resultados obtenidos por JENSEN et al. (2006) para el entonces denominado FS2002-H de Schaller (predecesor del BM1) también mostraban la existencia de variación explicada por el tipo de combustible, indicando la necesidad de calibrar el equipo por tipo de combustible, así como un importante error no explicado para humedades superiores al 40%. En el mismo estudio también se muestran  $R^2$  de calibraciones según tipo de especie (conífera, frondosa y especie de cultivo energético leñoso) con valores en su mayoría iguales o superiores a 0,9. Si bien actualmente BM1 dispone de calibraciones por tipo granulométrico, todavía no dispone de calibraciones por tipo de especie. La sensibilidad a la densidad aparente de las mediciones basadas en las propiedades dieléctricas, también señalada en el mencionado estudio, ha sido ya corregida por el fabricante del BM1.

Los costes derivados de disponer de un método rápido de estimación de la humedad no son muy diferentes entre métodos. No obstante, llama la atención que el aparato BM1, que requiere una inversión más elevada y que, al estimar la humedad en una muestra de astillas de mayor tamaño que el BLL, proporcione unos resultados tan poco alentadores. Según los resultados del presente estudio, es de destacar que el método de confección de una ecuación, curva o tabla de densidad aparente – humedad proporciona unos resultados con un margen de error muy bajo, comparable al margen de error que figura en los manuales de instrucciones de algunos aparatos de medición de humedad. Además los costes de confección de una ecuación son competitivos con respecto al uso de humidímetros y, además, los datos se pueden recoger a medida que se suministra astilla en los casos en se realice un muestreo para la determinación de la humedad.

## 6. Conclusiones

El poder realizar estimaciones de la humedad de lotes de astilla de una manera rápida y de costes controlados es clave para conseguir que el mercado de biocombustibles sólidos se normalice y sea más fiable. En este estudio se han estudiado tres métodos diferentes de estimación rápida de la humedad disponibles para pequeños empresarios. No obstante, dichos

métodos no pueden sustituir en ningún caso a un control de referencia, aunque sí que pueden ser utilizados por el sector productivo para facilitar las transacciones y los controles internos.

Los resultados obtenidos en este estudio mediante la elaboración de una ecuación densidad aparente – humedad revelan que se trata de un método que, manteniendo constantes la especie y el proceso de producción, puede tener una gran robustez y un error muy bajo.

Ello abre las puertas a la configuración sistemática de tablas densidad aparente – humedad, siempre y cuando se realicen para un tipo de astilla concreto, el cual suele ser el caso productores que trabajan en zonas forestales o agrarias. Con ello se quiere decir que la ecuación (curva o tabla) se debe realizar para una especie o mezcla de especies concretas, y para un tipo de granulometría o proceso de producción específico. De otro modo, se añadirían fuentes de error si se tratan simultáneamente varias especies (densidad de la madera) o procesos productivos o granulometría (apilamiento de la astilla). Aún así, se recomienda previamente realizar estudios que confirmen las conclusiones del presente, donde se puedan cubrir granulometrías más heterogéneas y rangos de humedad inferiores al 30%.

Por otro lado, también puede ser aconsejable continuar o abrir líneas de investigación que permitan profundizar en los efectos de la densidad de la madera o de la especie, el tipo de astillado, la distribución granulométrica y el estado del agua en la madera, entre otros, sobre sus propiedades eléctricas de cara a mejorar las estimaciones a realizar mediante aparatos basados en dichas propiedades.

## 7. Agradecimientos

El presente estudio se ha cofinanciado por el Fondo Europeo de Desarrollo Regional (FEDER) mediante el proyecto Interreg MED PROFORBIOMED 1S-MED10-009.

Asimismo, los autores desean agradecer a las empresas *Apensol S.L.* y *Productes Forestals de la Catalunya Central* su disponibilidad de material y equipos para la realización del estudio, así como al Dr. Daniel Kuptz (TFZ-Bayern) sus comentarios al borrador.

## 8. Bibliografía

AENOR; 2009; UNE-EN 15103. Biocombustibles sólidos. Determinación de la densidad aparente de pila.

AENOR; 2012; UNE-EN 14961-4. Biocombustibles sólidos. Especificaciones y clases de combustibles. Parte 4: Astillas de madera para uso no industrial.

CAVALLI, R. y BENVENUTTI, L.; 1999. Use of standard microwave oven for rapid measurement of wood moisture content. *Riv.Ing.Agr.* 30(2). 117-122 (resumen en inglés).

HARTMANN, H.; BÖHM, T.; JENSEN, P.D.; TEMMERMAN, M.; RABIER, F.; JIRJIS, R.; BURVALL, J.; HERSENER, J.L. y RATHBAUER, J.; 2004. Methods for bulk density determination of solid biofuels. *Proc. 2<sup>nd</sup> Wld.Conf.Tech.Exh.Biom.Energ.Ind.Clim.Prot.* 662-665.

JENSEN, P.D.; HARTMANN, H.; BÖHM, T.; TEMMERMAN, M.; RABIER, F. y MORSING, M.; 2006. Moisture content determination in solid biofuels by dielectric and NIR reflection methods. *Biomass Bioenerg.* 30 935-943.

LÓPEZ, I; 2012. Estimation of performance and methodologies of moisture devices for wood chips for small entrepreneurs. *Proc. 20<sup>th</sup> Eu.Bio.Conf.&Exh.* 2209 – 2302.

ÖNORM M7133, 1988. Energiehackgut Anforderungen und Prüfbestimmungen. Österreichisches Normungsinstitut.

NYSTRÖM, J. y DAHLQUIST, E; 2004. Methods for determination of moisture content in woodchips for power plants – a review. *Fuel* 83. 773-779.

PONZA, S.; 2010. Trabajo no publicado.