



Receta práctica paso a paso para construir dendrómetros de punto de bajo costo

JUAN P. DIEZ^{1,3,✉}; MANUEL DE PAZ²; SANTIAGO A. VARELA^{1,3}; GUILLERMINA DALLA SALDA^{1,3,5*}; ANNE-SOPHIE SERGENT^{1,3,4,5} & ALEJANDRO MARTÍNEZ-MEIER^{1,3,5}

¹Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Bariloche. Grupo de Ecología Forestal, Laboratorio de Ecología, Ecofisiología y Madera (LEEMA). San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina.

²Becario Postdoctoral Proyecto PICT 2015-0866. ³Instituto de Investigaciones Forestales y Agropecuarias IFAB (INTA-CONICET). San Carlos de Bariloche, Río Negro, Argentina. ⁴Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). ⁵Laboratorio Internacional Asociado (LIA) FORESTIA, INRAE, Francia-INTA, Argentina.

RESUMEN. Los dendrómetros automáticos de punto son equipos de medición que se usan en la actividad forestal para medir en alta resolución espacial y temporal las variaciones en el fuste de los árboles. Esta información con gran nivel de detalle es relevante para conocer los factores y las condiciones que gobiernan la contracción, la expansión y el crecimiento de los fustes, que ocurren como resultado de balances de contenido hídrico en el tallo y de la división celular del cambium. La variación del clima, la competencia por recursos y la actividad humana pueden incidir en el crecimiento del fuste. Este trabajo plantea la construcción paso a paso de equipos de medición a un costo muy inferior al de los equipos comerciales. Para ello, se lista una serie de elementos componentes y se detalla el procedimiento de armado, las calibraciones realizadas por el grupo de trabajo y las pruebas comparativas con dendrómetros comerciales. Los resultados preliminares muestran que es factible armar dendrómetros a partir de sus partes componentes y que los registros con los equipos desarrollados son similares a los de los comerciales. Esto permitiría ampliar las posibilidades de fenotipado a gran escala del crecimiento del fuste con un costo significativamente menor al de los equipos disponibles en el mercado.

[Palabras clave: crecimiento radial, fuste, potenciómetro, calibración, registrador de datos]

ABSTRACT. Practical step-by-step recipe to construct low-cost point dendrometers. Automatic point dendrometers are measuring equipment used in forestry to measure variations in the stem of trees in high spatial and temporal resolution. This information has a high level of detail and is relevant to assess the factors and conditions governing the contraction, expansion and growth of stems. This is due to balances of water content in the stem and cell division of the cambium. Variations of climate, competition for resources and human activity may influence the growth of the stem. This work proposes the step-by-step construction of a point dendrometer at a lower cost than would imply the acquisition of commercial equipment. For this, a series of component elements is listed, as well as the assembly procedure and calibrations carried out by the workgroup, and the comparative tests with commercial dendrometers. Preliminary results show it is feasible to assemble dendrometers from their component parts and that there is a similarity of records between developed and commercial equipment. This may allow large-scale phenotyping of the stem growth, at a significantly lower cost than acquiring commercial equipment.

[Keywords: radial growth, stem, potentiometer, calibration, data logger]

INTRODUCCIÓN

El incremento irreversible en el tamaño del fuste es el resultado de la división de células cambiales diferenciándose en células de xilema (al interior del cambium) y células de floema (hacia el exterior del cambium) secundario (Deslauriers et al. 2008). Los patrones diarios de expansión y compresión del fuste brindan información respecto del balance hídrico al cual los árboles son sometidos durante la estación de crecimiento (King et al. 2013). La variación de las dimensiones del tallo se relaciona con condiciones del ambiente como la temperatura, el fotoperíodo, la precipitación

y la humedad del suelo (MacDonald and Owen 1993; Shestakova et al. 2016; Schweingruber 2007; Siegmund et al. 2016). La magnitud del crecimiento también se relaciona con la competencia por recursos con los demás árboles del bosque o de la plantación, y con la incidencia de factores abióticos (Daniel et al. 1982).

Para registrar el inicio y el fin de la temporada de crecimiento o las variaciones de las dimensiones del tallo se necesitan herramientas precisas. Los dendrómetros son instrumentos de registro continuo de la variación del fuste de los árboles (Drew and

Editor asociado: Guillermo Martínez Pastur

✉ diez.juan@inta.gov.ar

Recibido: 28 de Noviembre de 2019

Aceptado: 17 de Febrero de 2020

Downes 2009), como así también de otros órganos de las plantas (e.g., frutos, raíces, etc.) (Ecomatik 2019; Fernandes et al. 2018). La información de la variación del incremento diario del fuste, su contracción, expansión y crecimiento acumulado se puede almacenar en dispositivos de tipo automático, lo cual brinda una elevada resolución temporal y espacial.

Estos dispositivos pueden tener distintos usos. Por ejemplo, ayudan a decidir la irrigación de un cultivo, evaluar actividades antrópicas que afectan el nivel de la napa freática, determinar el inicio y el fin de la estación de crecimiento (Biondi and Hartsough 2010; De Belder 2015; Zhang et al. 2016), establecer el grado de afectación de los factores ambientales en la variación de tamaño del órgano, detectar con precisión los momentos de heladas o la pérdida de agua en el almacenamiento de frutos y vegetales (Edaphic Scientific 2017; UP GmbH Firmensitz 2019).

Los dendrómetros evolucionaron desde los de lectura y registro manual hasta los actuales de registro continuo y automático que almacenan datos en un registrador digital. Entre los dendrómetros automáticos aplicados a fustes en especies de interés forestal se pueden diferenciar dos tipos: los de banda y los de punto. Los primeros poseen una banda, generalmente metálica, que se ajusta al fuste de los árboles e incluyen un mecanismo micrométrico de medición que registra cambios en la circunferencia del tronco. Estos tipos de dendrómetros pueden registrar cambios de hasta 30 μm (Pesonen et al. 2004). Por otro lado, los dendrómetros de punto, miden o registran la variación del tamaño del radio del fuste y pueden tener una precisión de entre 2 a 4 μm según el modelo y la marca. Algunos autores realizaron ensayos comparativos y concluyeron que los dendrómetros de banda subestiman el crecimiento radial; no así los de punto, comparados con el crecimiento registrado en el anillo y medido manualmente (Wang and Sammis 2008). Nos enfocaremos de ahora en más en este último tipo de dispositivo.

Nuestro grupo de trabajo estudia el potencial de adaptación de los bosques a condiciones cambiantes del clima, en especial aquellas que condicionan negativamente el crecimiento de los árboles, como las sequías. Comprender cómo los árboles responden a las variaciones ambientales —y, por consiguiente, cómo se forma la madera— permite entre otras cosas, establecer pautas de manejo que permitirían

mantener y hasta aumentar la capacidad productiva de los bosques. Esto podría asegurar la provisión de bienes en un contexto de clima cambiante.

Generar herramientas que ayuden a tomar decisiones sobre el manejo forestal requiere obtener información, como la que brinda una red de monitoreo compuesta por dendrómetros que registren el crecimiento continuo a lo largo de la temporada de crecimiento. La información que brindan estos dispositivos es costosa de lograr. Una manera de generar un salto de escala en el estudio de las respuestas de los árboles a las variaciones del ambiente es generar equipos de medición de bajo costo, capaces de brindar datos acorde a los estándares internacionales de precisión y confiabilidad. El objetivo del presente trabajo es generar información para el desarrollo de equipos de bajo costo capaces de medir y almacenar datos con alta prestación. Estos equipos se pueden construir en laboratorios a partir de elementos partes ensamblados. Por otro lado, describimos las prestaciones capaces de lograr por estos, comparando sus registros con los de dendrómetros comerciales.

COMPONENTES Y ENSAMBLADO DE LOS DENDRÓMETROS

Para la confección de los dendrómetros de punto son necesarios cinco componentes: 1) potenciómetro de desplazamiento lineal (Figura 1a), 2) cable de vinculación entre el potenciómetro y el registrador de datos (Figura 1b), 3) soporte de fijación (Figura 1d, e, f y g), 4) elemento protector del potenciómetro (Figura 1h), y 5) registrador de datos con conexiones al cable que lo vincula con el potenciómetro (Figura 1i) con su caja estanca protectora (Figura 1j).

Potenciómetro de desplazamiento lineal

El balance entre el agua que el árbol transpira y la recarga por intermedio de las raíces genera una contracción o expansión radial diaria, que es copiada por el desplazamiento lineal del émbolo de un potenciómetro en contacto directo con el fuste del árbol (Figura 1c), mediante la estructura que sirve de soporte (Figura 1d, e, f y g). Por otro lado, la formación de células nuevas mediante la diferenciación del cambium en xilema y floema secundario genera una contracción continua del émbolo, capaz de registrar de manera continua el crecimiento a lo largo de la estación. Estos movimientos hacen variar



Figura 1. Imágenes de los distintos componentes de los dendrómetros de punto: a) Potenciómetro de desplazamiento lineal; b) Cable telefónico para intemperie de 4 conductores (se usan sólo 3 en la conexión del potenciómetro con el registrador); c) Émbolo del potenciómetro en contacto con el fuste, d y e) Soporte de aluminio al fuste del árbol de los potenciómetros, que hace las veces de protector; f) Soporte de aluminio tipo perfil U; g) soporte de aluminio tipo perfil L; h) protección del dendrómetro mediante botella de plástico; i) Registrador de datos con peine de conexión y fichas estéreo plug 2.5 mm; j) Caja estanca con acceso al registrador mediante tapón plástico roscado; k) Conexión directa entre registrador y ordenador portátil a través de cable de conexión USB - mini USB.

Figure 1. Images of the different components of the point dendrometers: a) Linear displacement potentiometer; b) 4-wire underground telephone cable (only 3 are used in the connection of the potentiometer with the recorder); c) Potentiometer plunger in contact with the shaft, d and e) Aluminum bracket to the shaft of the potentiometer shaft, which acts as a protector; f) Aluminum bracket type U profile; g) aluminum bracket type profile L; h) dendrometer protection by plastic bottle; i) Data logger with connection comb and stereo plug 2.5 mm tabs; j) Waterproof case with access to the recorder by means of threaded plastic plug; k) Direct connection between recorder and laptop via USB-mini-USB connection cable.

la resistencia eléctrica del potenciómetro (RS Pro®), obteniendo valores de voltaje iniciales desde próximos a cero a su máximo según su configuración, en nuestro caso 2.5 V. Se obtienen así valores que son almacenados en la memoria del registrador, los cuales son transformados, previa calibración, a unidades de medición de distancia.

La calibración se realiza en laboratorio mediante sucesivos desplazamientos del émbolo del potenciómetro, a lo largo de su carrera, a distancias regulares. En cada punto de desplazamiento del émbolo se mide con un calibre digital la distancia recorrida y se registra, a su vez, el voltaje. Las unidades de voltaje se transforman en valores de distancia (mm) a través de una regresión lineal.

Se realizaron calibraciones individuales con 13 potenciómetros RS Pro® conectados a los registradores marca HOBO® modelo UX120-006M utilizados a campo. Se fijó el potenciómetro a una prensa acoplada a un calibre digital marca Essex® (Figura 2a). Cada 250 μm , aproximadamente, se tomaron lecturas de voltaje medido por el registrador conectado en línea a una computadora. Se tomaron 44 puntos por calibración, lo cual totalizó 11 mm lineales hasta saturación del voltaje.

Ajustando un modelo de regresión lineal simple, se analizaron los datos con el

programa Prism5 (Graph Pad Software San Diego CA) y no se encontraron diferencias significativas entre las distintas relaciones de voltaje con la distancia de desplazamiento del potenciómetro (pendiente y ordenada al origen de la recta). En función de ello se seleccionó un modelo único que permitió transformar los valores de voltaje en distancia (Figura 2b). Todas las calibraciones fueron realizadas en laboratorio con condiciones de temperatura controlada. En todos los casos se usó un cable de 10 m de longitud, de similares características a los utilizados para montar los equipos en el campo. La calibración llevada a cabo determinó que el potenciómetro utilizado tiene un desplazamiento de su émbolo de 10 $\text{mm} \pm 0.5 \text{ mm}$, y una resolución de 2 μm .

Cables

La conexión entre potenciómetro y registrador de datos se hace a través de cables tipo telefónico tetrapolar para uso a la intemperie. Por medio de una ficha estéreo *plug* de 2.5 mm se realiza la conexión entre el potenciómetro y el registrador, intercalándose en medio del recorrido una bornera con el objetivo de evitar la manipulación de las fichas al registrador (Figura 1i). Los cables del potenciómetro y los cables de conexión a los registradores, al igual que las fichas estéreo *plug* 2.5 mm que se insertan en los registradores, se unieron mediante

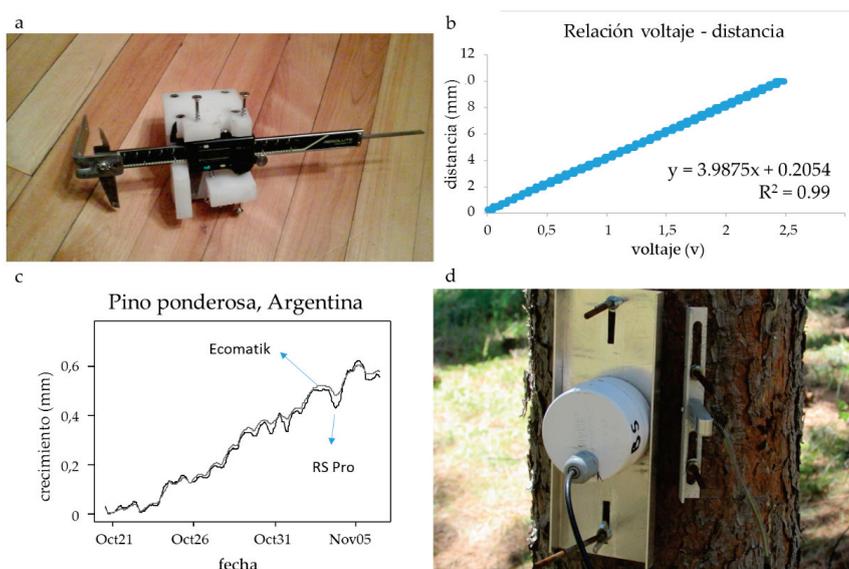


Figura 2. a) Calibre digital montado en un soporte de plástico (prensa) para realizar las calibraciones de los dendrómetros (foto: gentileza de Annie Deslauries); b) Curva de calibración de los potenciómetros RS Pro conectado a un registrador de datos Hobo modelo UX120-006M para la configuración de 2.5 V de alimentación del cable; c) Variaciones de las dimensiones del fuste registrado sobre un mismo ejemplar de *Pinus ponderosa* con un dendrómetro comercial (Ecomatik) y un potenciómetro experimental (RS Pro); d) Dendrómetros colocados sobre el mismo tallo, experimental a la izquierda y Ecomatik a la derecha.

Figure 2. a) Digital caliper mounted on a plastic support (press) to perform the dendrometer calibrations (photo courtesy of Annie Deslauries); b) Calibration curve of the RS Pro potentiometers connected to a Hobo model UX120-006M for the configuration of 2.5 V of power of the cable; c) Variations of the dimensions of the stem registered on the same specimen of *Pinus ponderosa* with a commercial dendrometer (Ecomatik) and an experimental potentiometer (RS Pro); d) Dendrometers placed on the same stem, experimental on the left and Ecomatik on the right.

soldaduras con estaño y se protegieron con aislante termo contraíble. Si bien el cable con el cual se conectaron fue tetrapolar, sólo se usan 3 conductores del mismo. Los tres cables representan la masa (cable amarillo), la alimentación del potenciómetro (cable rojo) y la señal de lectura (cable verde). Se separó la conexión en 2 partes para reducir al mínimo la posibilidad de falso contacto entre la ficha estéreo *plug* 2.5 mm y el registrador.

Estructura de fijación

Algunos dendrómetros comerciales tienen el soporte de fijación, que puede ser de aluminio, en forma de ángulo con 2 ranuras para la sujeción al árbol mediante tornillos o varillas roscadas. Esta misma estructura de sujeción hace a la vez de protector a las inclemencias climáticas (Figura 1g).

El potenciómetro y los elementos protectores (ver apartado siguiente) se montan en las estructuras de fijación de aluminio (Figura 1d, e y f). Los modelos desarrollados tienen ventajas y desventajas. En algunos casos, las estructuras de fijación funcionan a la vez como elemento protector, formando una caja romboidal (Figura 1d y e). Esta estructura

no reemplaza a la necesidad de colocar el potenciómetro en su correspondiente elemento protector. Para la sujeción al árbol, la estructura de fijación tiene en sus extremos unos cilindros huecos, a modo de caños de pequeña sección, por donde se introducen las varillas roscadas 3/16" para la sujeción al árbol. Las varillas se insertan al árbol previa realización de los orificios correspondientes con mecha de 5 mm (profundidad de 4 a 5 cm). Se recomienda que los orificios se encuentren paralelos entre sí y parcialmente rotados del eje principal del árbol, para evitar que algún exudado (resina o goma dependiendo de si se tratasen de coníferas o latifoliadas) interfiera en el registro del émbolo del potenciómetro.

La desventaja de este tipo de estructura romboidal de fijación es su alto costo, debido a que utiliza más material, que a la vez debe plegarse, demandando soldaduras. Por lo tanto, hay un incremento no sólo de materia prima, sino también de la mano de obra. Otra consideración a tener en cuenta en este tipo de estructura es que las varillas deben estar separadas a la misma distancia que los orificios de los soportes o tubos de la estructura de aluminio. De lo contrario, será muy difícil regular el potenciómetro cuando se tenga que

acercar al fuste del árbol. El soporte mostrado en la Figura 1e tiene una mejora con respecto al mostrado en la Figura 1d en relación con los varios orificios de sujeción hechos en el perfil de aluminio en ambos extremos del soporte, lo que da más flexibilidad al momento de la elección de la posición del equipo al fijarlo al árbol.

El otro modelo de estructura de fijación consiste en una chapa de aluminio doblado en forma de perfil en U (Figura 1f), donde en la parte cóncava se sitúa el conjunto del elemento protector y potenciómetro. En la estructura de fijación hay realizadas unas hendijas por donde se pueden introducir los tornillos o varillas roscadas para la sujeción al fuste. Este modelo, si bien no protege el potenciómetro como el anterior, es mucho más liviano y económico al ser más sencilla su confección y necesitar menor cantidad de materia prima y mano de obra. Permite que el sistema de fijación al árbol sea más flexible debido a la forma de las hendijas por las cuales se introduce la varilla roscada de sujeción.

Elementos protectores utilizados en potenciómetros y registradores

Se probaron diferentes estructuras protectoras, desde tubos de PVC de 60 mm de diámetro con tapas usados comúnmente para desagües (Figura 1e y f) hasta cajas plásticas para contactores eléctricos y de tipo estancas usadas para circuitos eléctricos exteriores. Todos estos materiales son recomendados en función de las estructuras de fijación que se adopte. Por ejemplo, en el diseño de estructuras de fijación con perfiles en U, se utilizaron cajas estancas de electricidad, de 70x70x40 mm (Figura 1d y h), para asegurar la estanqueidad de los potenciómetros. En el caso de los registradores, se usaron cajas de 115x165x80 mm (Figura 1i y j) en cuyo interior se colocó una chapa para la fijación por medio de imanes incorporados en la carcasa del registrador. En la parte superior derecha de las cajas se realizó un agujero con mecha copa de 20 mm, donde se pegó y fusionó una tapa a rosca (pico de botella plástica con su correspondiente tapa) para permitir realizar la descarga del registrador sin necesidad de abrir la caja estanca. Esto evitó la manipulación del conjunto registrador-fichas y peines de conexión que pudiesen causar algún falso contacto.

Registrador de datos

Al igual que en el caso de los elementos protectores, se probaron dos tipos de registradores contemplando opciones nacionales e internacionales con diferentes capacidades de almacenaje, software de conexión de interface y cantidad de conectores. En primera instancia se usaron registradores de datos de 2 canales y luego, en función de obtener prestaciones más amplias, se conectaron a registradores de 4 canales. De esta manera, es posible disminuir los costos por dendrómetro, ya que cuatro potenciómetros, con sus respectivas estructuras de fijación, protección y cables se conectan a un solo registrador de datos. La capacidad de almacenamiento de datos dependerá de la configuración del registrador, en directa relación con los intervalos regulares de tiempo de registro. Este puede ser cada 30 segundos a 1 hora (inclusive más). 1 hora es el intervalo máximo de tiempo recomendado para el estudio de la contracción y expansión diaria del fuste. Los dispositivos registran los datos de variación de voltaje en su memoria que luego deben ser transformados en unidades de distancia según la calibración de laboratorio. En la Tabla 1 puede apreciarse las características técnicas del modelo UX120-006M marca HOBBO® de 4 canales de lectura de voltaje.

Con un simple cable se puede acceder desde un ordenador portátil para descargar los datos. Sólo se debe desenroscar la tapa de botella soldada a la caja estanca (que contiene y protege al registrador) a la altura del orificio que coincide en su parte interna

Tabla 1. Características técnicas del registrador de datos de 4 canales.

Table 1. Technical characteristics of the 4-channel data logger.

Características Técnicas	Registrador de 4 canales
Cantidad de canales	4 (0-2.5 V)
Capacidad de almacenaje	4 MB (1.9 millones máx)
Temp. de operación	-20 °C a 70 °C (95% HR)
Respuesta	Lineal
Display digital	Sí
Alimentación	2 pilas AAA
Duración de la batería	Aprox. 1 año
Resolución	40 µV
Precisión	0.1 mV

con la ubicación del puerto mini USB del dispositivo (Figura 1j y k).

PRINCIPALES CONSIDERACIONES

El registrador de 4 canales UX120-006M HOBO® permite realizar la lectura en base a varias condiciones de programación. En nuestro caso usamos un rango de lectura de 0 a 2.5 V, siguiendo un protocolo de trabajo compartido con otras instituciones que formaron parte del proyecto internacional conjunto Dynawood (LE Studium Consortium "Dynawood": Dynamic of wood formation and adaptation of forest trees to climate variation. Financiamiento de Región Centro, Francia. 2016-2018).

Dos propuestas de trabajo que son llevadas en paralelo permitirán validar los registros que están siendo obtenidos por los dendrómetros desarrollados. Por un lado, se dispone de una red de ensayos comparativos con potenciómetros de punto de marca comercial reconocida. La EEA Bariloche del INTA, que integra dicha red, monitorea el crecimiento continuo de árboles de pino ponderosa (que forman parte de un jardín clonal de individuos selectos en un programa de mejora genética ubicado dentro de la EEA INTA Bariloche) con los dos modelos de dendrómetros (nuestro desarrollo y el comercial) montados lo más próximo posible uno del otro. La Figura 2c permite observar las lecturas de ambos dendrómetros. Las lecturas son similares tanto en forma como en valores absolutos, mientras

que la figura 2d permite observar cómo están instalados ambos dendrómetros en el árbol para permitir la comparación. El Consorcio Internacional de trabajo conformado a partir del proyecto Dynawood permite repetir el monitoreo comparativo en Canadá sobre especies boreales como *Abies balsamea* (L.) Mill. y *Picea mariana* (Mill.) Britton, Sterns and Poggenb; en México con especies tropicales como *Tabebuia donnell-smithii* Rose, en Suecia y Francia sobre especies semi-continental (*Larix decidua* Mill y *Picea abies* (L.) Karst) y en la Argentina en especies subtropicales y templadas del género *Pinus* y *Eucaliptus* en Misiones y Tandil, respectivamente.

Por otro lado, instalamos y pusimos en funcionamiento 26 dendrómetros de punto (nuestro modelo) a lo largo de la distribución continua del ciprés de la cordillera (*Austrocedrus chilensis* (D. Don) Pic-Serm. and Bizzarri) en la Argentina. Para obtener perfiles anatómicos, finalizada la primera estación de crecimiento de monitoreo se recolectaron microtarugos de 2 mm de diámetro. Estos perfiles permitirán corroborar la información de crecimiento obtenida para toda la estación de crecimiento por parte de los dendrómetros.

La variación promedio horaria de 3 árboles de pino ponderosa se presenta en la Figura 3. El análisis comparativo de la información obtenida está siendo procesado. Ésta permitirá estimar, por ejemplo, las diferencias entre cada par de dendrómetros para el promedio mensual de variación diaria de las dimensiones del fuste, la variación en

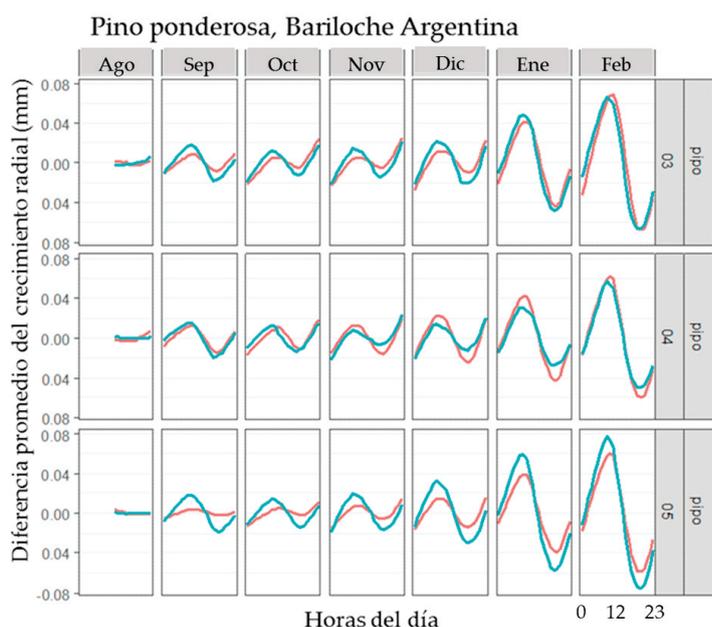


Figura 3. Promedio mensual de la variación horaria del tamaño del fuste de *Pinus ponderosa* a lo largo del día, en tres individuos ubicados en el jardín clonal de la EEA INTA Bariloche. Tipo de dendrómetro: ec=Ecomatik; rs=RS Pro. Pipo=Pino ponderosa.

Figure 3. Monthly average of the time variation throughout the daily day of the size of the *Pinus ponderosa* shaft of three individuals located in the clonal garden of the INTA Bariloche EEA. Dendrometer type: ec=Ecomatik; rs=RS Pro. Pipo=Ponderosa pine.

porcentaje entre las dos lecturas a lo largo de la temporada de crecimiento, diferencias en los registros horarios y los máximos y mínimos registrados diariamente y también el crecimiento acumulado y las relaciones con las variaciones ambientales.

Más allá de que los equipos construidos se puedan usar para monitorear el crecimiento, la estación de crecimiento y la contracción y la expansión diaria, tanto en términos de valores relativos o absolutos, es necesario saber que el ambiente puede influir sobre dichos registros. Un factor distorsivo principal como la temperatura se asocia a la expansión propia no sólo de los sensores (potenciómetros) sino del equipo en su conjunto (De Belder 2015). Consideraciones en cuanto al rendimiento de estos equipos serán tenidos en cuenta y evaluados de manera comparativa con otros equipos comerciales con el fin de mejorar su prestación.

CONSIDERACIONES FINALES

Si bien no es parte de este estudio presentar los resultados comparativos de la información obtenida y la performance de los dendrómetros desarrollados en nuestro laboratorio, éstos parecen brindar información confiable, segura y precisa, comparable con dendrómetros comerciales. Esto se deduce de los gráficos comparativos aún no analizados y

de los primeros resultados obtenidos de la red de dispositivos experimentales instalados.

Los dendrómetros desarrollados resultan ser significativamente más económicos. Esto, sumado a la performance comparativa obtenida, permite aventurar que es factible usar en investigación forestal los dendrómetros construidos a partir de potenciómetros experimentales. No obstante, se sugiere continuar la evaluación o disponer de los ensayos comparativos a largo plazo para cotejar la información brindada por cada uno de ellos, y así poder validar el uso de los equipos desarrollados.

AGRADECIMIENTOS. Al proyecto Dynawood (LE STUDIUM CONSORTIUM "Dynawood": Dynamic of wood formation and adaptation of forest trees to climate variation. Financiamiento de Región Centro, Francia. 2016-2018) por la posibilidad de realizar la comparación de los dendrómetros en el banco clonal de Pino ponderosa en la EEA INTA Bariloche y al proyecto Topwood (Wood phenotyping tools: properties, functions and Quality Unión Europea Marie-Curie. 2015-2019) y PICT 2015-0866 (Relaciones entre caracteres funcionales, adaptativos y tecnológicos de la madera de especies forestales de interés comercial. 2016-2019) por la financiación para la adquisición de partes componentes para realizar el armado de los dendrómetros.

REFERENCIAS

- Biondi, F., and P. Hartsough. 2010 Using Automated Point Dendrometers to Analyze Tropical Treeline Stem Growth at Nevado de Colima, Mexico. *Sensors (Basel)* **10**(6):5827-5844. <https://doi.org/10.3390/s100605827>.
- Daniel, T. W., J. A. Helms, and F. S. Backer. 1982. *Principios de Silvicultura*. México. Mc Graw-Hill. Pp. 492.
- De Belder, A. 2015. Comparison of different dendrometers and LVDT-sensors in laboratory and field conditions. Masterproef voorgedragen tot het behalen van de graad van Master in de bio-ingenieurswetenschappen: Milieutechnologie. Faculteit Bio-ingenieurswetenschappen. Universiteit Gent. Germany. Pp. 50.
- Deslauriers, A., S. Rossi, and T. Anfodillo. 2008. Cambial phenology, wood formation and temperature thresholds in two contrasting years at high altitude in southern Italy. *Tree Physiol* **28**:863-871. <https://doi.org/10.1093/treephys/28.6.863>.
- Drew, D. M., and G. M. Downes. 2009. The use of precision dendrometers in research on daily stem size and wood property variation: A review. *Dendrochronologia* **27**(2):159-172. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2009.06.008>.
- Ecomatik. 2019. Catalog about Plant growth, Sap flow, Leaf Temperature and Soil Moisture. URL: tinyurl.com/yachd3bu.
- Edaphic Scientific. 2017. Dendrometers: Multi-Purpose Sensors. URL: tinyurl.com/ybmpu8lb.
- Fernandes, R., V. Hernández Santana, and M. Cuevas Sánchez. 2018. Are fruit dendrometers reliable to schedule irrigation in olive trees? *Olive Management, Biotechnology and Authenticity of Olive Products*. Olivebioteq 2018:T06-P3.
- King, G., P. Fonti, D. Nievergelt, U. Büntgen, and D. Frank. 2013. Climatic drivers of hourly to yearly tree radius variations along a 6 °C natural warming gradient. *Agricultural and Forest Meteorology* **168**:36-46. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.08.002>.
- Mac Donald, J. E., and J. N. Owens. 1993. Bud development in coastal Douglas-fir seedlings under controlled-environment conditions *Canadian Journal of Forest Research* **23**(6):1203-1212. <https://doi.org/10.1139/x93-152>.
- Pesonen, E., K. Mielikäinen, and H. Mäkinen. 2004. A new girth band for measuring stem diameter changes. *Forestry* **77**:431-439. <https://doi.org/10.1093/forestry/77.5.431>.

- Schweingruber, F. H. 2007. Wood Structure and Environment. Springer. Pp. 85.
- Shestakova, T. A., E. Gutiérrez, A. V. Kirilyanov, J. J. Camarero, M. Génova, A. A. Knorre, J. C. Linares, V. Resco de Dios, R. Sánchez-Salguero, and J. Voltas. 2016. Forests synchronize their growth in contrasting Eurasian regions in response to climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **113**(3):662-667. <https://doi.org/10.1073/pnas.1514717113>.
- Siegmund, J. F., T. G. M. Sanders, I. Heinrich, E. van der Maaten, S. Simard, G. Helle, and R. V. Donner. 2016. Meteorological Drivers of Extremes in Daily Stem Radius Variations of Beech, Oak, and Pine in Northeastern Germany: An Event Coincidence Analysis. *Front. Plant Sci* **7**:733. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.00733>.
- UP GmbH Firmensitz. 2019. Fruitquality-Size. URL: tinyurl.com/ybwsjz4g.
- Wang, J., and T. W. Sammis. 2008. New automatic band and point dendrometers for measuring stem diameter growth. *Applied Engineering in Agriculture* **24**(6):731-742. <https://doi.org/10.13031/2013.25361>.
- Zhang, R., Y. Yuan, X. Gou, T. Zhang, C. Zou, C. Ji, Z. Fan, L. Qin, H. Shang, and X. Li. 2016. Intra-annual radial growth of *Schrenk spruce* (*Picea schrenkiana* Fisch. et Mey) and its response to climate on the northern slopes of the Tianshan Mountains. *Dendrochronologia* **40**:36-42. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2016.06.002>.