



**2025** | **16-20**  
GIJÓN | JUNIO

9º CONGRESO **FORESTAL** ESPAÑOL

**9CFE-1844**

---

Organiza





## Proyecto Sintetic: Digitalización e Innovación en trazabilidad forestal mediante aplicaciones móviles y RFID

RUANO SASTRE A. (1), EKENSTEDT J. (2), STEGEL S. (3), POVEDA J. (4), MULLOOLY G. (4), TRUJILLO A. (5), SANDAK J. (6), MARTÍN CORTÉS C. (1), MOLA-YUDEGO B. (7), CORONGIU M. (5) y PICCI G. (1,5).

(1) Consorci Centre de Ciència i Tecnologia Forestal de Catalunya (CTFC)

(2) Arboreal AB.

(3) Simtrona, Razvojna Dejavnost, D.O.O

(4) Treemetrics Limited

(5) Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR)

(6) Innorenew Coe Center Odlicnosti za Raziskave in Inovacije na Področju Obnovljivih Materialov in Zdravega Bivanjskega Okolja (INNO)

(7) Universidad de Finlandia Oriental (University of Eastern Finland, UEF)

### Resumen

La gestión sostenible de los recursos forestales se enfrenta a desafíos significativos relacionados con la eficiencia operativa, la precisión en las mediciones y la trazabilidad de los productos derivados. En este contexto, la digitalización del sector forestal emerge como una solución clave para optimizar procesos, garantizar la sostenibilidad y cumplir con normativas internacionales, como el Reglamento de Deforestación de la UE (EUDR). Este proyecto aborda la integración de tecnologías avanzadas, como aplicaciones móviles, sensores LiDAR y sistemas RFID, para transformar la manera en que se realizan inventarios forestales, se clasifica la madera y se gestiona la trazabilidad desde el bosque hasta el aserradero.

### Palabras clave

Inventario forestal, trazabilidad forestal, RFID, aplicación móvil, geodatabase.

#### 1. Introducción

El desarrollo de tecnologías digitales y la transición hacia la Industria 4.0 han generado cambios significativos en diversos sectores industriales, incluyendo la cadena de valor forestal. La aplicación de estas tecnologías en la industria forestal, también conocida como "Forestry 4.0", ha promovido innovaciones que abarcan desde la digitalización de los inventarios forestales hasta la implementación de sistemas inteligentes para la trazabilidad y optimización de procesos. Este cambio paradigmático es impulsado por la integración de tecnologías como el Internet de las Cosas (IoT), sistemas ciberfísicos (CPS) y herramientas de sensorización avanzada, las cuales transforman la gestión y producción forestal (Lu, 2017; Feng et al., 2020).

En las últimas dos décadas, las tecnologías digitales de información y comunicación (TIC) han sido gradualmente adoptadas por el sector forestal europeo. Estas incluyen aplicaciones como el monitoreo territorial e inventarios



forestales a gran escala con datos obtenidos por sensores satelitales, la detección remota basada en LiDAR y escáneres láser terrestres (TLS), y el uso de maquinaria de cosecha equipada con sensores de posicionamiento y medición de troncos que generan datos digitales en formatos estándares como StanForD, utilizados para facturación y gestión de operaciones (Müller et al., 2019; Picchio et al., 2019). Además, los aserraderos han comenzado a utilizar sensores ópticos y de rayos X para evaluar las características de la madera y optimizar los procesos de aserrado (Leblon & Stirling, 2015). A pesar de su efectividad para mejorar procesos específicos, estos datos no siempre pueden ser interrelacionados debido a la transformación y manipulación repetida de los elementos a lo largo de la cadena de valor forestal, así como por la falta de interoperabilidad entre diferentes estándares digitales (Müller et al., 2019).

Diversas investigaciones han explorado cómo estas tecnologías pueden mejorar la precisión y eficiencia en actividades clave de la cadena de suministro forestal, como la planificación de cosechas, el transporte de madera y la venta de productos forestales. Por ejemplo, Müller et al. (2019) destacan cómo la conectividad de los procesos a través de un "internet de árboles y servicios" puede optimizar la planificación y organización de operaciones, así como los procesos de post aprovechamiento. Asimismo, el uso de herramientas basadas en detección remota y etiquetado RFID permite una trazabilidad más efectiva, desde el inventario de árboles hasta la entrada al aserradero (Picchi, 2020; Kaulen et al., 2023).

En este contexto, tecnologías como la identificación de árboles individuales (ITD) y aplicaciones móviles basadas en LiDAR están comenzando a ser utilizadas para digitalizar operaciones forestales. Keefe et al. (2022) y Tatsumi et al. (2022) subrayan la importancia de estas herramientas para mapear árboles individuales, optimizar rutas de aprovechamiento y garantizar la sostenibilidad en las operaciones. Sin embargo, aún persisten desafíos relacionados con la interoperabilidad de sistemas, la precisión en condiciones topográficas complejas y la integración de datos a lo largo de diferentes etapas de la cadena de suministro (He et al., 2021). Esto se agrava por la falta de sistemas diseñados para transferir información digital entre las partes interesadas y almacenarla en servicios de datos comunes, lo que dificulta el establecimiento de una trazabilidad sistemática (Feng & Audy, 2020).

El proyecto Sintetic (<https://sinteticproject.eu/>) propone una solución a estos desafíos mediante el desarrollo de una plataforma integrada para la adquisición, gestión y procesamiento sistemático de datos, que abarca desde inventarios forestales hasta los productos finales de la industria de la madera. La plataforma interrelacionará la información digital obtenida por diversos sensores y procesos en toda la cadena de valor forestal, garantizando su disponibilidad en estándares unificados y formatos predefinidos como StanForD (Müller et al., 2019). Además, en el proyecto se introducirá un sistema de trazabilidad a nivel de ítem capaz de identificar y localizar con alta precisión cada elemento producido y transformado en la cadena de valor. Para ello, combinará tecnologías como RFID, códigos perforados, CT-log, escáneres de visión y códigos de barras/QR, adaptadas específicamente a la industria forestal europea. Estas innovaciones incluyen un



sistema de marcado para perforar códigos únicos en la madera y un sistema de huellas dactilares geométricas que permite la identificación única de troncos y tablas en el aserradero (Murphy et al., 2012; Picchi, 2020).

En esta comunicación se abordan los avances recientes en tecnologías aplicadas a la obtención de datos de bosque y la cadena de suministro forestal, analizando las oportunidades y desafíos asociados con la integración de diversos sistemas. La integración tiene la intención de facilitar la adopción de tecnologías emergentes y promover la transición hacia una industria forestal más digitalizada, sostenible y eficiente.

## 2. Objetivos

El objetivo del proyecto es aumentar la digitalización del sector forestal mediante la integración de diversas tecnologías para obtener una trazabilidad eficiente y precisa de la madera. Para ello en este proyecto usaremos para un sistema manual de aprovechamiento una aplicación móvil, tarjetas de radiofrecuencia y una geodatabase centralizada donde se almacenan y gestionan los datos que pueden ser visualizados.

La aplicación para iPhone Tree Scanner revoluciona la gestión forestal al ofrecer herramientas avanzadas para medir, clasificar y hacer el seguimiento de trozas de madera y árboles en pie. Aprovechando características integradas de los teléfonos inteligentes, como sensores LiDAR, GNSS y cámaras, la aplicación permite la medición precisa de trozas, incluyendo diámetros y longitudes. También mide árboles en pie durante inventarios y tasaciones, calculando el diámetro a la Altura del Pecho (DBH), la altura del árbol y su conicidad. Mediante la integración de etiquetas UHF RFID y un lector portátil, la aplicación garantiza una identificación y trazabilidad fluida de las trozas. La capacidad de sincronización con sensores portátiles, como el Hitman HM 220, facilita la evaluación de la calidad de la madera en el monte su distribución óptima y su almacenamiento. La gestión centralizada de datos a través de servidores optimiza los flujos de trabajo desde el monte hasta el aserradero y permite generar informes detallados. La integración con ForestHQ proporciona análisis de inventario, simulaciones de productos madereros y reportes digitales interactivos que apoyan la toma de decisiones informada y aseguran la trazabilidad de cada ítem. Estas funciones permiten a los profesionales forestales optimizar la gestión de recursos, agilizar operaciones y apoyar prácticas sostenibles.

Las funcionalidades innovadoras de la aplicación incluyen la generación de nubes de puntos 3D para una estimación precisa del volumen de árboles en pie y trozas. La aplicación mide los diámetros y los centros de las trozas en intervalos específicos, procesa la curvatura utilizando LiDAR y podría implementar medidas a prueba de manipulación de la trazabilidad mediante las imágenes de los extremos de las trozas. Los usuarios pueden asignar identificadores de parcelas, especificar especies y vincular trozas con los árboles de origen mediante las etiquetas UHF RFID. Al digitalizar procesos manuales y utilizar tecnologías de



vanguardia, esta aplicación unida a la geodatabase puede transformar el sector forestal, asegurando precisión, eficiencia en la medición, clasificación y trazabilidad de la madera.

Los datos recogidos en la app asociados al código de la etiqueta UHF RFID se pueden descargar y/o sincronizar automáticamente con la geodatabase iniciando la trazabilidad en el monte, ya sea del fuste entero o de la troza que le llegará al aserradero. Una vez los datos se sincronizan con la geodatabase en la plataforma ForestHQ, puede visualizarse de forma intuitiva la información recogida y se pueden descargar informes detallados. Estos informes incluyen datos de la masa forestal obtenidos tras el inventario, simulaciones virtuales de productos extraíbles para una planificación eficiente del aprovechamiento, y la cantidad de trozas clasificadas por tamaño, volumen y calidad. La geodatabase es compatible también la información que puede generar una cosechadora forestal modificada, pudiendo usarse el sistema tanto en aprovechamientos mecanizados como manuales. La información almacenada ayuda a optimización de procesos, simplificar facturación y puede servir para un control de stock en el parque de madera del aserradero más preciso ya que la información de cada troza o árbol entero que entra con el camión viene descrita y clasificada en la geodatabase. También se está implementando una API para subir la información requerida para cumplir con la EUDR directamente, simplificando la carga burocrática requerida y puede servir para certificación de productos.

### 3. Metodología

Durante la toma de datos con la aplicación se han realizado varias pruebas comparando los diámetros a la altura de pecho de los árboles en obtenidas con la app con las medidas obtenidas mediante forcípula forestal. Se han comparado mediadas de las distintas versiones de la app utilizadas viéndose que las últimas versiones generan menores errores. Para generar estas medidas se basan en las medidas generadas tras aplicar RANSAC (Random sample consensus) a la nube de puntos del sensor LiDAR. En el caso de que haya sido posible la segmentación de la imagen, se integran ambas mediciones para obtener resultados más precisos. La comparación de las alturas se llevó a cabo mediante un Vertex III HAGLOF como referencia, considerando la altura obtenida la más aproximada a la medida real. Para realizar estas mediciones, se tomaron las medidas a una distancia aproximada de la altura del árbol a medir con ambos. En el caso de las trozas o pies enteros desramados, se usó una cinta pi para comparar los diámetros obtenidos y una cinta métrica para las longitudes obtenidas. En la actual versión de la app las entalladuras dan errores de medición, por lo que en este trabajo todas las mediciones son con cortes transversales sin entalladura. Para evitar variaciones en la reproducibilidad, todas las mediciones manuales y digitales fueron realizadas por el mismo operario.

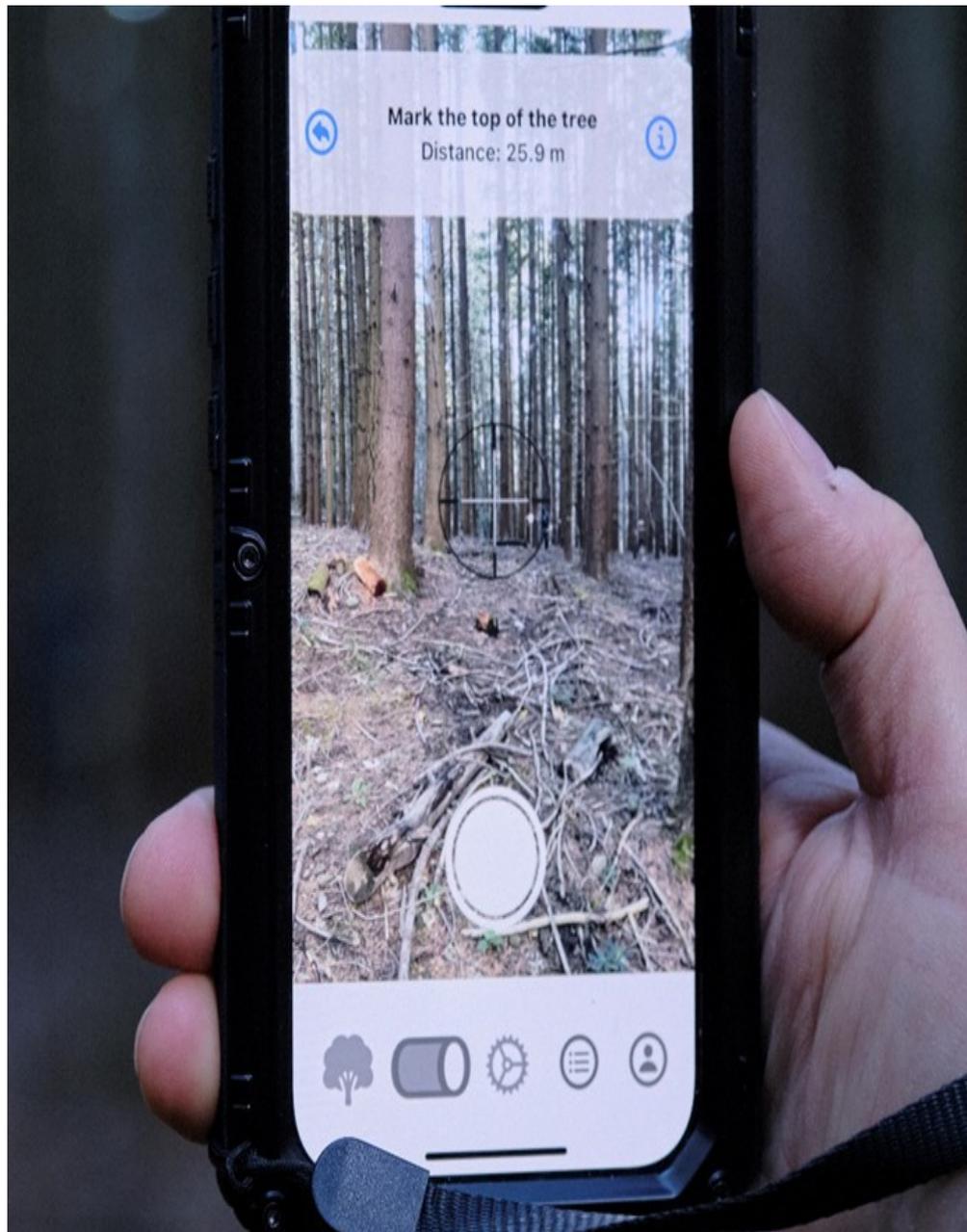


Figura 1. Imagen de la pantalla durante el inventario *con la app*





Figura 2. Captura de pantalla de una prueba

Todos los pies medidos durante el inventario, así como las trozas y su información asociada se descargaron en el ordenador previamente a su sincronización con la geodatabase mediante Wi-fi. Tras la sincronización se testó en el interfaz de visualización, actualmente en desarrollo, la correcta agregación y visualización de los datos, así como la funcionalidad de generación de informes. La base de datos georeferenciada almacena datos estructurados (SQL), semi-estructurados (XML) y no estructurados (TIFF). El sistema está diseñado con un front-end basado en un visor web que permite analizar inventarios, visualizar datos y conectarse con otras aplicaciones de los socios del proyecto. En el back-end se realiza una integración de la información, transformaciones, modelizado y extracción de características.

Dada la diversidad de configuración de líneas de aserradero, se han establecido dos tipos típicos sobre los que se están llevando a cabo pruebas, pero los datos preliminares obtenidos en ambos tipos han sido prometedores.

En el primer tipo de aserradero, el camión forestal descarga su carga en una primera línea, se produce el descortezado y se almacenan las trozas clasificadas para su posterior aserrado. En este caso se probó en la cinta transportadora un sistema de 4 antenas direccionales de 9 dBi para leer las tarjetas de RFID insertadas en cada troza o árbol entero descortezado.



*Figura 3. Imagen de la disposición de las antenas para la lectura en la línea*

En el segundo tipo de aserradero se probó inicialmente un arco con antenas polarizadas circularmente en distintos ángulos de lectura. Sin embargo, tras los primeros resultados se optó por una antena polarizada circularmente colocada en un mástil telescópico de 3 metros para leer con seguridad todas las tarjetas. Este sistema no es completamente automático, ya que requiere que el operario pase la antena por los laterales del camión o que las trozas sean cargadas de manera que las etiquetas queden orientadas hacia la misma dirección.

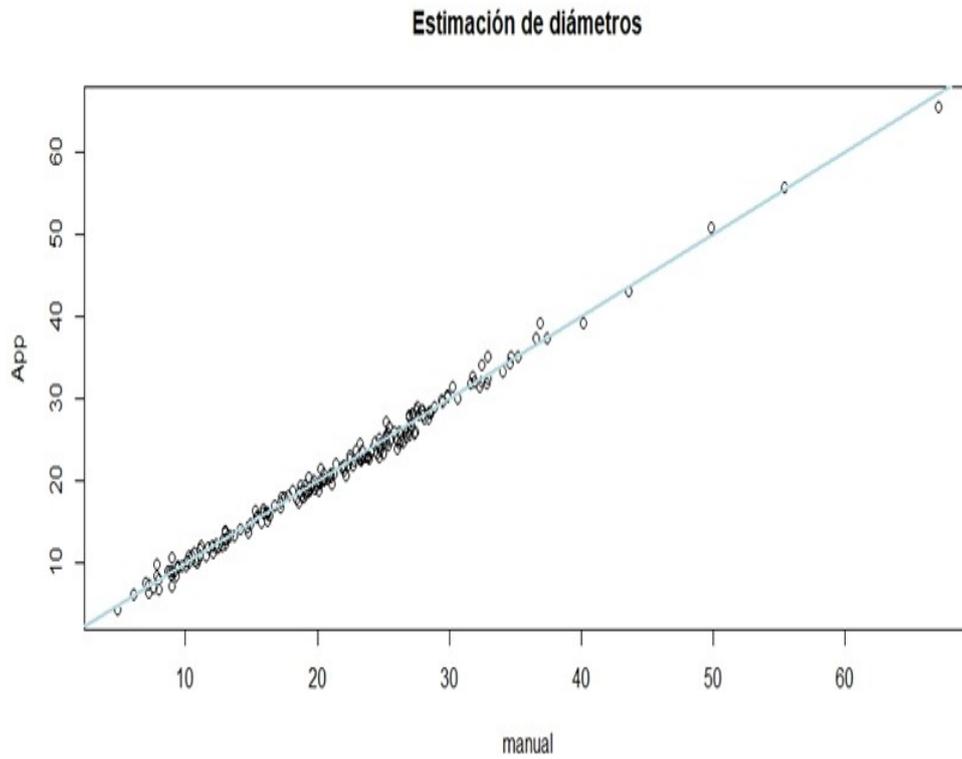


*Figura 4. Imagen del proceso de lectura de tarjetas RFID en el camión forestal*

#### **4. Resultados**

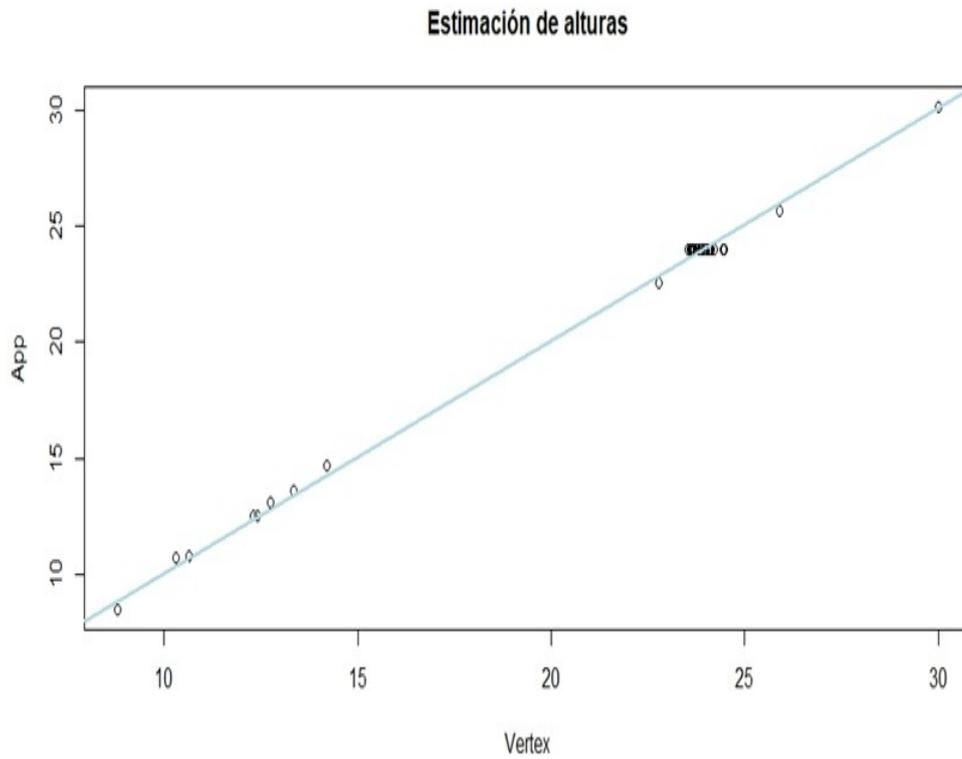
A continuación, vamos a ver los resultados que se han obtenido de los distintos sistemas testeados para lograr la trazabilidad de la madera obtenida en el monte.

En el inventario, se han hecho pruebas de las mediciones del dbh y de la altura de los árboles. Con un error estándar en las mediciones realizadas con el iPhone 14 pro y un error estándar de 0.002331 se muestran los resultados de las mediciones de diámetro obtenidas en los árboles en pie, el error relativo medio es de 3 % y absoluto 0.607 cm.



*Figura 5. Estimación de diámetros en pie por la app*

Respecto a la medición de las alturas se pueden observar los resultados de las pruebas llevadas a cabo. Las pruebas llevadas a cabo sugieren un error estándar de 0.001597 y un error relativo medio del 1% y absoluto del 0.23 cm.



*Figura 6. Estimación de alturas por la app*

En la parte de trazabilidad de las trozas o árbol entero, se han estudiado también por separado la precisión en la captura de diámetros con la precisión en la captura de la longitud de la troza. El error estándar del diámetro de la troza es de 0.007509. Para las medidas de la longitud de la troza el error estándar es de 0.002202.

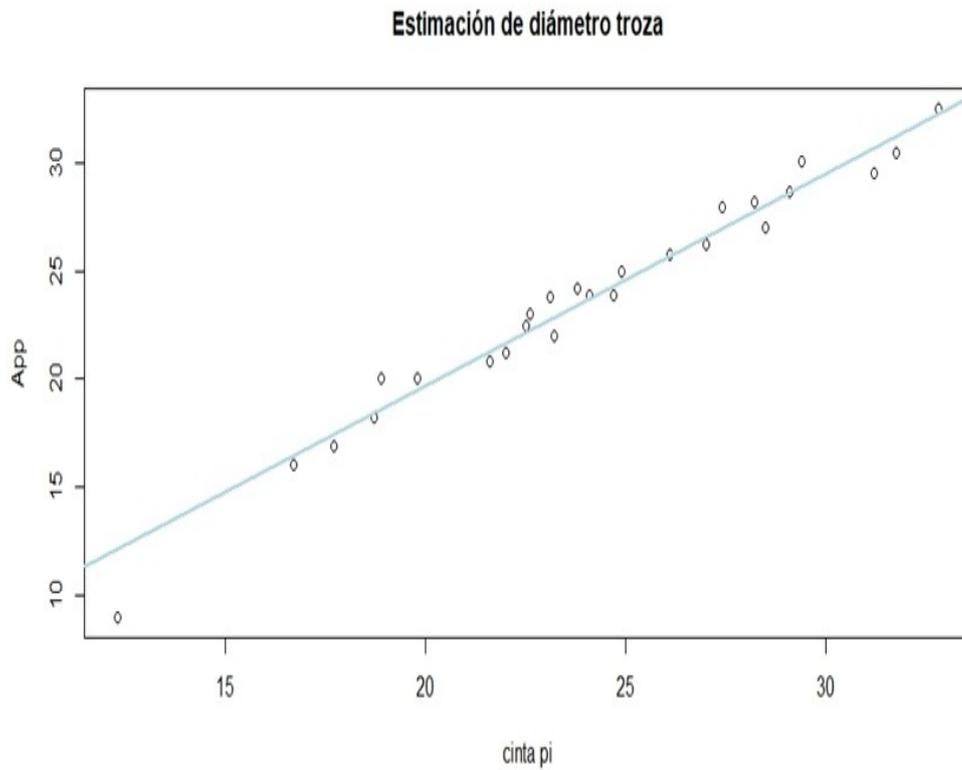


Figura 7. Estimación de diámetros de las trozas por la app

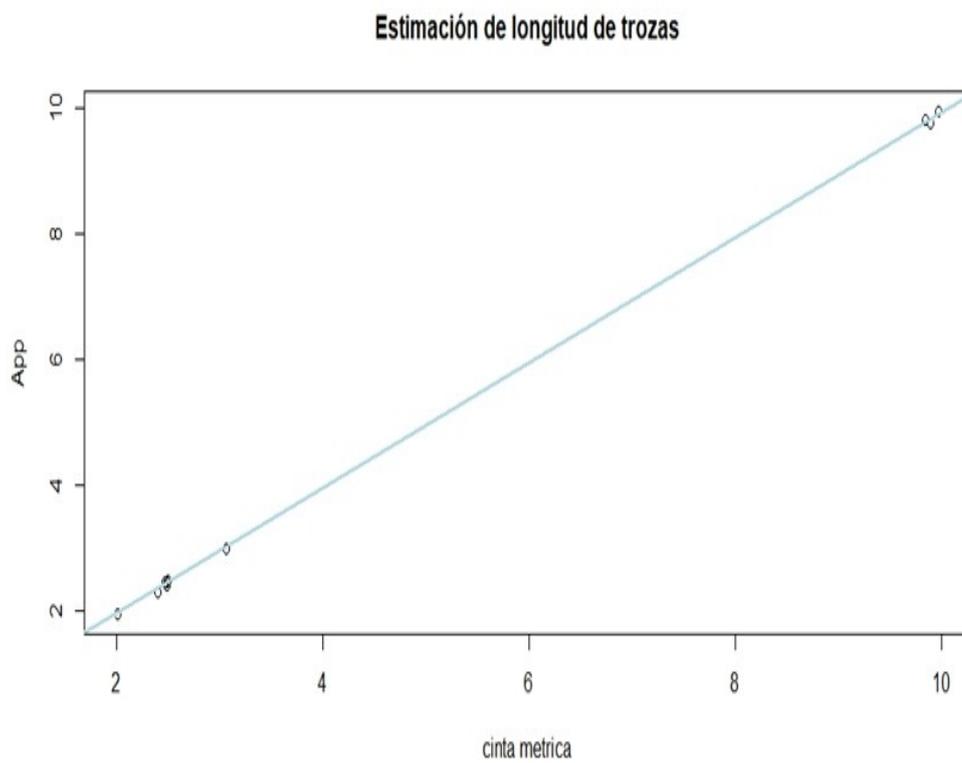


Figura 8. Estimación de longitud de troza por la app



Todos los pies medidos durante el inventario, así como las trozas y su información asociada se almacenaron correctamente en la Geodatabase y en el visor se pudo visualizar los datos agregados y testear la generación de informes y descarga de datos desde el servidor.

### 5. **Discusión**

Durante las mediciones realizadas, se observó que la repetibilidad del diámetro de los árboles en pie obtenida con la aplicación es inferior a la de las mediciones manuales realizadas desde el mismo punto. Sin embargo, las diferencias entre las mediciones manuales disminuyen significativamente cuando el operario tiene mayor experiencia.

También se ha observado que con iPhone superiores al 13 pro se obtienen mejores precisiones en las mediciones, probablemente debido al desarrollo de la tecnología y los sensores que incorporan los teléfonos.

En cuanto a las mediciones de diámetro en árboles en pie, el error de medición ha disminuido progresivamente con las mejoras introducidas en las diferentes versiones de la aplicación, alcanzando en la última versión un error absoluto del 2.33%. Respecto a las alturas de los árboles en pie, se ha detectado la necesidad de ampliar el esfuerzo muestral para representar mejor todo el rango de alturas. Con el muestreo actual, el error relativo es del 1%, con un error medio de 0.23 cm. En demostraciones donde los interesados probaron la aplicación, se observó que el posicionamiento correcto del dispositivo por parte del operario es un factor crucial para minimizar el error. Por ello, se está trabajando en implementar funciones de ayuda para guiar al usuario durante las mediciones.

En el caso de los diámetros de trozas, los resultados obtenidos con la última versión de la aplicación muestran una alta precisión. Sin embargo, para diámetros pequeños (inferiores a 9 cm), se registró un error relativo del 4.0% debido a una medición atípica. Al excluir esta medición, el error relativo se reduce al 2.7%. Dado que la precisión disminuye con diámetros menores, se están recopilando imágenes de trozas con diámetros de hasta 7 cm para mejorar el entrenamiento de los modelos. No se consideran diámetros menores, ya que suelen estar por debajo del límite comercial. Asimismo, se trabaja en mejorar la precisión de las mediciones de trozas con entalladuras, ya que estas tienden a subestimar el diámetro real. En cuanto a las longitudes de las trozas, el error relativo es del 1.3% y el absoluto de 0.04 cm. Se requiere un mayor muestreo para representar adecuadamente una variedad de tamaños.

Actualmente, se están implementando mejoras en la precisión de las mediciones utilizando el modelo Segment Anything Model 2.1 (SAM2.1). Este enfoque promete optimizar la velocidad y precisión al escanear tanto árboles en pie como trozas

Todos los pies medidos durante el inventario, así como las trozas y su



información asociada se almacenaron correctamente en la Geodatabase y en el visor se pudo visualizar los datos agregados y testear la generación de informes y descarga de datos desde el servidor, con lo que la parte de trazabilidad queda asegurada. La geodatabase en vez de utilizar un sistema descentralizado con base en mecanismos de consenso distribuido como el Blockchain, para testear el sistema se ha optado por *centralizado* en el cual todos los datos están registrados en una base de datos bajo el control de las personas del CNR trabajando en el proyecto, además este sistema tiene una prestación más rápida y necesita menos recursos de cómputo (y por tanto energéticos), que lo hace ideal para mostrar la viabilidad del proyecto.

Respecto a la lectura de las tarjetas de RFID en los aserraderos en los que el camión forestal descarga y directamente pasan a una cinta transportadora se obtuvo un 100% de lecturas, con lo que en este tipo de aserraderos en los que se hace una clasificación previa es muy sencillo obtener la información de cada troza. En el caso en el que el camión forestal descarga directamente en el parque de madera los resultados iniciales con los arcos de lectura que se probaron mostraron limitaciones, debido a ángulos de lectura desfavorables, interferencias entre señales y tiempo de lectura limitado. Sin embargo, se están llevando a cabo pruebas al respecto para abordar los problemas. Mediante el sistema manual en este tipo de aserraderos usando una antena colocada en un palo extensible, se tarda alrededor de 90 s para escanear las cuatro caras del camión. Aunque no es un sistema completamente automático, esta operación es viable sin afectar significativamente el flujo de trabajo, mientras que se prueban sistemas totalmente automáticos.

El coste actual de las etiquetas RFID hace que la trazabilidad sea económicamente viable solo para trozas de alta calidad o destinadas al aserrío, ya que el costo no es asumible para biomasa. En los aprovechamientos manuales el sistema de marcado con troquelado aún no está desarrollado del todo, lo que permitiría una trazabilidad completa sin coste unitario añadido. Aunque hay empresas como DeepLai que aseguran poder hacerlo para maderas duras. En todo caso, los datos obtenidos en campo, tanto de inventario como de escaneo de trozas, aportan valor significativo para tasaciones, inventarios, estimación de stock y facturación, demostrando la utilidad del sistema en el manejo integral de recursos forestales.

### 6. Conclusiones

La digitalización mediante tecnologías como Tree Scanner y geodatabases centralizadas mejora significativamente la eficiencia y trazabilidad en el sector forestal.

La integración de sensores avanzados y sistemas de sincronización facilita la planificación forestal sostenible y el cumplimiento de normativas internacionales.

Aunque los resultados son prometedores, se necesita optimizar sistemas de lectura RFID y ampliar el muestreo para una representatividad más amplia de los



datos.

Los costos actuales de las tarjetas de UHF RFID hacen que la trazabilidad solo sea posible en madera de calidad para aserrío. Cuando la tecnología de troquelado manual esté desarrollada, esto permitirá un ahorro de costes unitario significativo para la trazabilidad de todas la madera.

La colaboración entre tecnologías avanzadas y procesos manuales muestra el camino hacia una transformación digital completa en el sector forestal.

Estos avances permiten una gestión más precisa, eficiente y sostenible, sentando las bases para un futuro digitalizado en el manejo forestal.

### 7. Agradecimientos

Quiero agradecer a la unión europea por la financiación recibida para llevar a cabo el proyecto Sintetic a través del programa Horizon Europe. También a todas las personas implicadas en el proyecto que lo están haciendo posible.

### 8. Bibliografía

BORZ, S. A.; TOAZA, J. M. M.; PROTO, A.; 2024. Accuracy of two LiDAR-based augmented reality apps in breast height diameter measurement. *Ecol. Inform.* 81, 102550, doi:10.1016/j.ecoinf.2024.102550

FENG, Y.; AUDY, J.-F.; 2020. Forestry 4.0: A framework for the forest supply chain toward Industry 4.0. *Gest. Prod.* 27(4), e5677, doi:10.1590/0104-530x5677-20

HE, Z.; HE, Z.; TURNER, P.; TURNER, P.; 2021. A Systematic Review on Technologies and Industry 4.0 in the Forest Supply Chain: A Framework Identifying Challenges and Opportunities. *Logistics* 5(4), 88, doi:10.3390/logistics5040088

KAULEN, A.; STOPFER, L.; LIPPERT, K.; PURFÜRST, T.; 2023. Systematics of Forestry Technology for Tracing the Timber Supply Chain. *Forests* 14(9), 1718, doi:10.3390/f14091718

KEEFE, R. F.; ZIMBELMAN, E. G.; PICCHI, G.; 2022. Use of Individual Tree and Product Level Data to Improve Operational Forestry. *Curr. For. Rep.* 8, 148-165, doi:10.1007/s40725-022-00160-3

LEBLON, B.; STIRLING, R.; 2015. Sensors in the Forest Products Industry. *Wood Mater. Sci. Eng.* 10(1), 1-2, doi:10.1080/17480272.2015.1017345

LU, Y.; LU, Y.; 2017. Industry 4.0: A Survey on Technologies, Applications and Open Research Issues. *J. Ind. Inf. Integr.* 6, 1-10, doi:10.1016/j.jii.2017.04.005



MÜLLER, F.; JAEGER, D.; HANEWINKEL, M.; 2019. Digitization in wood supply – A review on how Industry 4.0 will change the forest value chain. *Comput. Electron. Agric.* 162, 206-218, doi:10.1016/j.compag.2019.04.002

MURPHY, G.; CLARK, J. A.; PILKERTON, S. J.; 2012. Current and Potential Tagging and Tracking Systems for Logs Harvested from Pacific Northwest Forests. *West. J. Appl. For.* 27(2), 84–91, doi:10.5849/wjaf.11-027

NIȚĂ, M. D.; BORZ, S. A.; 2023. Accuracy of a Smartphone-based freeware solution and two shape reconstruction algorithms in log volume measurements. *Comput. Electron. Agric.* 205, 107653, doi:10.1016/j.compag.2023.107653

PICCHI, G.; 2020. Marking Standing Trees with RFID Tags. *Forests* 11(2), 150, doi:10.3390/f11020150

PICCHIO, R.; PROTO, A. R.; CIVITARESE, V.; CIVITARESE, V.; DI MARZIO, N.; LATTERINI, F.; 2019. Recent Contributions of Some Fields of the Electronics in Development of Forest Operations Technologies. *Electron.* 8(12), 1465, doi:10.3390/electronics8121465

PICHLER, G.; POVEDA LOPEZ, J. A.; PICCHI, G.; NOLAN, E.; KASTNER, M.; STAMPFER, K.; KÜHMAIER, M.; 2017. Comparison of remote sensing-based RFID and standard tree marking for timber harvesting. *Comput. Electron. Agric.* 140, 214-226, doi:10.1016/j.compag.2017.05.030

SANDIM, A.; AMARO, M.; SILVA, M. E.; DA CUNHA, J. T.; MORAIS, S. G.; MARQUES, A.; FERREIRA, A. S.; LOUSADA, J.; FONSECA, T.; 2023. New Technologies for Expedited Forest Inventory Using Smartphone Applications. *Forests* 14(8), 1553, doi:10.3390/f14081553

TATSUMI, S.; TATSUMI, S.; YAMAGUCHI, K.; YAMAGUCHI, K.; FURUYA, N.; FURUYA, N.; 2022. ForestScanner: A mobile application for measuring and mapping trees with LiDAR-equipped iPhone and iPad. *Methods. Ecol. Evol.* 14(7), 1603-1609, doi:10.1111/2041-210X.13900.