

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En  
Plantaciones De Manzano*



**VALIDACIÓN DE UN SENSOR DE ULTRASONIDO PARA LA  
CARACTERIZACIÓN DE LA VEGETACIÓN EN PLANTACIONES  
DE MANZANO.**

Trabajo final de Màster

Màster KET4FOOD

**Autor:** Stefani Hernandez Diaz

**Tutor:** Emilio Gil Moya

Oct. 2021

## **Agradecimientos**

En las siguientes líneas expreso mis agradecimientos a las personas que me han apoyado todo este tiempo, en la realización y cumplimiento de uno de mis objetivos propuestos.

***Al Dr. Emilio Gil, director de la UMA, docente y Tutor;***

Quiero expresarle mis respetos y admiración por su profesionalidad y carácter personal. Agradezco todo el apoyo y preocupación brindada en todo este tiempo, también por ser muy constante y persistente a lo largo de la adquisición de nuevos conocimientos, si bien es cierto no fue fácil, pero sin su ayuda no lo hubiera logrado.

***Al PhD. Francisco García, docente;***

Le agradezco por su ayuda, paciencia, por la acertada orientación y discusión crítica que me permitió un buen aprovechamiento en la realización de este TFM.

Quiero agradecer a la vez al equipo de la Unidad de Mecanización Agraria, quienes me han ayudado y apoyado todo este tiempo a Jordi Biscamps, a Bernat Salas por su constante ayuda y a Javier Campos.

***Al Dr. Eduard Hernández, coordinador del Master y docente;***

Agradezco toda la ayuda, orientación, apoyo, todo lo enseñado y aprendido gracias a Usted y sin duda decirlo su constante dedicación y preocupación que siempre ha mostrado a cada alumno del master.

También quisiera agradecer al resto de personal docente e investigador de la ESAB del Master. **“Tecnologías Facilitadoras de la Industria Alimentaria y Bioprocesos”** la acogida con la que me recibieron y los continuos apoyos prestados.

Ahora es el momento de agradecer a mis amigos y familiares su cariño y presencia:

***A Gladys Diaz, mi madre;***

Agradezco tu apoyo incondicional, tu constante preocupación, tus enseñanzas, valoro mucho tus consejos y sobre todo te quiero.

***A Esther Diaz y Cesar Vargas, mis tíos;***

Les agradezco por todo lo brindado, por su preocupación constante, siempre han estado pendiente de mí, considerándome como una hija más.

***A Juan Carlos;***

Te agradezco por todo, siempre alentándome a seguir y lograr mis objetivos. Quizá físicamente no estas, pero emocionalmente siempre has estado apoyándome.

***A María José Fernández, mi amiga;***

Estoy eternamente agradecida por tener una amiga como tú, que me mostro siempre su cariño, su apoyo incondicional y su preocupación. Gracias por siempre animarme a seguir y por ayudarme durante el master.

## **Resumen**

La UE adaptó un conjunto de propuestas para hacer que las políticas de clima, energía, transporte e impuestos de la UE, sean adecuadas para reducir las emisiones netas de gases de efecto invernadero, teniendo como objetivo reducir las emisiones en un 55% para el 2030, sin embargo, para lograr estas reducciones, se puso en marcha el GREEN DEAL europeo que embarca distintos ámbitos de actuación.

Uno de los ámbitos de actuación de esta comisión es el plan de acción "**De la Graja a la Mesa**" que abarca todas las fases de la cadena de alimentación y formula una política alimentaria más sostenible, a través de esta estrategia se reforzará el plan para combatir con el cambio climático y proteger el medio ambiente. De tal forma que la Unión Europea impulsó el programa HORIZONTE 2020 donde se creó diversos proyectos como INNOSETA y OPTIMA con el objetivo de desarrollar, innovar e implementar nuevas técnicas de aplicación fitosanitarias, por ello, una de las conceptos más importantes es la caracterización de la vegetación, antes de realizar cualquier aplicación de productos fitosanitarios que con frecuencia son desproporcionadas, y por ello es imprescindible para asegurar una correcta dosificación.

De este modo, la tecnología respecto a los sensores nos ayuda a poder caracterizar la vegetación. En tal sentido el objetivo de este trabajo ha sido la validación de un sensor de ultrasonidos para la Caracterización de la Vegetación en plantaciones de manzanos, para ello se utilizaron 6 sensores de ultrasonidos con 3 tipos de configuraciones Narrow; de cono estrecho, Medium de cono promedio y Wide de cono ancho. Los sensores se han colocado en un mástil a distintas alturas y se montaron en un Pulverizador Inverter Qi 9.0 (FEDE) con Tecnología H30. Los ensayos se realizaron en vegetación tanto artificial como real, simulando distintas densidades para ver la respuesta de la señal de los sensores.

Los resultados mostraron que es fiable utilizar estos sensores y la configuración propuesta para estimar la anchura de vegetación en manzano a tres alturas. Además, se vio que la configuración de los sensores es menos importante cuando se trabaja con vegetaciones muy densas, pero que en vegetaciones poco densas (estadios fenológicos muy iniciales) es recomendable trabajar con configuraciones de haz entre medio y ancho. También se ha desarrollado una metodología para la estimación del número de huecos en la vegetación a partir de la señal de los sensores de ultrasonidos.

## **Resum**

La UE va adaptar un conjunt de propostes per fer que les polítiques de clima, energia, transport i impostos de la UE, siguin adequades per reduir les emissions netes de gasos d'efecte hivernacle, tenint com a objectiu reduir les emissions en un 55% pel 2030, però, per aconseguir aquestes reduccions, es va posar en marxa el GREEN DEAL europeu que s'embarca diferents àmbits d'actuació.

Un dels àmbits d'actuació d'aquesta comissió és el pla d'acció "**De la Graja a la Taula**" que abasta totes les fases de la cadena d'alimentació i formula una política alimentària més sostenible, a través d'aquesta estratègia es reforçés el pla per combatre amb el canvi climàtic i protegir el medi ambient. De tal manera que la Unió Europea impuls al programa HORIZÓ 2020 on es va crear diversos projectes com INNOSETA i OPTIMA amb l'objectiu de desenvolupar, innovar i implementar noves tècniques d'aplicació fitosanitàries, per això, una dels conceptes més importants és la caracterització de la vegetació, abans de realitzar qualsevol aplicació de productes fitosanitaris que sovint són desproporcionades, i per això és imprescindible per assegurar una correcta dosificació.

D'aquesta manera, la tecnologia pel que fa als sensors ens ajuda a poder caracteritzar la vegetació. En aquest sentit l'objectiu d'aquest treball ha estat la validació d'un sensor d'ultrasons per a la Caracterización de la Vegetación en plantaciones de pomeres, per això es van utilitzar 6 sensors d'ultrasons amb 3 tipus de configuracions Narrow; de con estret, Medium de con mitjana i Wide de con ample. Els sensors s'han col·locat en un pal a diferents altures i es van muntar en un Polvoritzador Inverter Qi 9.0 (FEDE) amb Tecnologia H30. Els assajos es van realitzar en vegetació tant artificial com a real, simulant diferents densitats per veure la resposta del senyal dels sensors.

Els resultats van mostrar que és fiable utilitzar aquests sensors i la configuració proposta per estimar l'amplada de vegetació en pomera a tres altures. A més, es va veure que la configuració dels sensors és menys important quan es treballa amb vegetacions molt denses, però que en vegetacions poc denses (estadis fenològics molt inicials) és recomanable treballar amb configuracions de feix entre mig i ample. També s'ha desenvolupat una metodologia per a l'estimació de l'nombre de buits en la vegetació a partir del senyal dels sensors d'ultrasons.

## **Abstract**

The EU adapted a set of proposals to make the EU's climate, energy, transport and tax policies adequate to reduce net greenhouse gas emissions, aiming to reduce emissions by 55% by 2030. However, to achieve these reductions, the European GREEN DEAL was launched, which encompasses different areas of action.

One of the areas of action of this commission is the action plan "**From the Farm to the Table**" that covers all phases of the food chain and formulates a more sustainable food policy, through this strategy the plan to combat climate change and protect the environment. In such a way that the European Union promoted the HORIZON 2020 program where various projects such as INNOSETA and OPTIMA were created with the aim of developing, innovating and implementing new phytosanitary application techniques, therefore, one of the most important concepts is the characterization of the vegetation, before carrying out any application of phytosanitary products that are often disproportionate, and therefore it is essential to ensure correct dosage.

In this way, the technology regarding the sensors helps us to be able to characterize the vegetation. In this sense, the objective of this work has been the validation of an ultrasound sensor for the Characterization of Vegetation in apple plantations. For this, 6 ultrasound sensors with 3 types of Narrow configurations were used; narrow cone, Medium with average cone and Wide with wide cone. The sensors have been placed on a mast at different heights and mounted on a Qi 9.0 Inverter Sprayer (FEDE) with H30 Technology. The tests were carried out in both artificial and real vegetation, simulating different densities to see the response of the signal from the sensors.

The results showed that it is reliable to use these sensors and the proposed configuration to estimate the width of vegetation in apple trees at three heights. Furthermore, it was found that the configuration of the sensors is less important when working with very dense vegetations, but that in sparse vegetations (very early phenological stages) it is advisable to work with beam configurations between medium and wide. A methodology has also been developed to estimate the number of holes in the vegetation from the signal of the ultrasound sensors.

## **Índice**

---

<b>Agradecimientos .....</b>	<b>II</b>
<b>Resumen .....</b>	<b>III</b>
<b>Resum .....</b>	<b>IV</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>V</b>
1. Introducción .....	1
2. Objetivos .....	7
3. Materiales y métodos .....	8
3.1 Sensores de Ultrasonidos .....	8
3.1.1 Especificaciones técnicas de los sensores .....	8
3.1.2 Diseño del sistema de adquisición de datos .....	10
3.2 Ubicación de los ensayos .....	12
3.2.1 Vegetación Artificial .....	12
3.2.2 Vegetación natural (Cultivo de manzanos) .....	15
4. Análisis de datos.....	16
5. Resultados y discusión .....	18
5.1 Vegetación Artificial .....	18
5.2 Vegetación en fincas comerciales .....	23
5.2.1 Finca Agro Erruz .....	23
5.2.2 Finca El Paso .....	28
5.2.3 Configuración óptima para la caracterización de Vegetación, finca Erruz y El Paso .....	33
6. Conclusiones.....	35
7. Bibliografía .....	36
Índice de Figuras .....	40
Índice de Gráficos.....	41
Índice de Tablas.....	42
Índice de Ecuaciones .....	43

## **1. Introducción**

El Green Deal europeo (COM, 2019), puesto en marcha el 11 de diciembre del 2019 en Bruselas, es una comisión que responde a los desafíos del clima y medio ambiente, esto se trata de implementar nuevas estrategias de crecimiento destinado a transformar la UE en una sociedad equitativa y próspera, aspirando a proteger, mantener y mejorar el capital natural de la UE, así como proteger la salud y el bienestar de los ciudadanos frente a los riesgos y efectos medioambientales, al mismo tiempo esta inversión inicial también representa una oportunidad para situar a Europa con firmeza en una nueva senda de crecimiento sostenible e integrador. La Comisión ha anunciado iniciativas que abarcan distintos ámbitos de actuación.

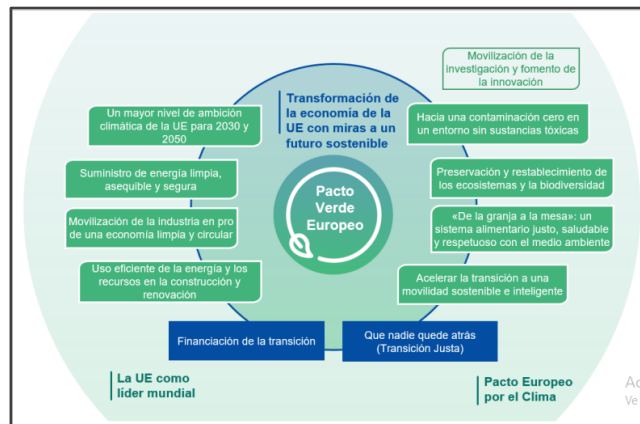
Para poder cumplir los objetivos del Green Deal, es imprescindible conceder el mayor valor a la protección y al restablecimiento de los ecosistemas naturales. La comisión europea establece iniciativas que abarcan distintos ámbitos de actuación, como la alimentación y la agricultura, el suministro de energía limpia, la industria, la producción y el consumo, las grandes infraestructuras, el transporte, la construcción, la fiscalidad y las prestaciones sociales.

Todas las áreas de actuación están estrechamente interconectadas y se refuerzan mutuamente. Green Deal, hará un uso coherente de todos los instrumentos de actuación como la regulación y la normalización, la inversión y la innovación, las reformas nacionales, el dialogo con los interlocutores sociales y la cooperación internacional. El pilar europeo de derechos sociales guiará la acción velando por que nadie se quede atrás.

La producción de alimentos sigue contaminando el aire, agua y el suelo, esto contribuye a la pérdida de biodiversidad, al cambio climático y consumo excesivo recursos naturales.

Por ello, uno de los ámbitos muy enmarcados en el Green Deal, es el sector agrícola que engloba también a la producción de alimentos, la comisión establece como el plan de acción "**De La Granja a La Mesa**" (COM, 2020) abarca todas las fases de la cadena alimentaria y formula una política alimentaria más sostenible, esta estrategia reforzara el plan para combatir el cambio climático, proteger el medio ambiente y preservar la biodiversidad, con las políticas agrícolas y pesqueras se lograra reforzar aún más este plan que garantizara un nivel de vida digno para los agricultores y pescadores. **(Figura 1)**

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*



**Figura 1:** Pacto Verde Europeo, iniciativas en los diferentes ámbitos de actuación. Fuente: European Green Deal (COM, 2019)

Con la implementación de nuevas tecnologías y los descubrimientos científicos, junto con el aumento de la sensibilización por parte de los productores de alimentos, que son fundamentales para gestionar la transición, la UE desarrolla vías innovadoras para proteger las cosechas de plagas y enfermedades, considerando viable las nuevas técnicas innovadoras para mejorar la sostenibilidad del sistema alimentario, garantizando al mismo tiempo que sean seguras.

La DIRECTIVA 2009/128 / CE establece la adaptación de los planes de acción nacional que fija como objetivos cuantitativos, metas, medidas y calendarios, con el fin de reducir los riesgos y efectos de la utilización de plaguicidas en la salud humana y el medio ambiente, fomentar el desarrollo y la gestión integrada de plagas y el planteamiento de técnicas alternativas como objetivo de reducir la dependencia del uso de plaguicidas.

Estos planes también incluirán minimizar o prohibir el uso de plaguicidas en algunas zonas específicas, como en zonas públicas o grupos vulnerables (parques y jardines públicos, campos de deportes y áreas de recreo, áreas escolares y de juego infantil), definido en el artículo 3 del Reglamento (CE) nº 1107/2009 o zonas protegidas que define la Directiva 2000/60/CE u otras zonas señaladas a efectos de establecer las necesarias medidas de conservación de acuerdo con lo dispuesto en la Directiva 79/409/CEE y en la Directiva 92/43/CEE.



*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En  
Plantaciones De Manzano*

La caracterización de la vegetación es fundamental para determinar la dosis y el volumen de aplicación, definir correctamente los parámetros de una vegetación es uno de los aspectos importantes, cuando existe uniformidad de la vegetación en la parcela, la caracterización es simple, pero cuando hay una gran variabilidad en la parcela es necesario respaldarse de herramientas que nos permitan determinar la dicha variabilidad. Los métodos utilizados hasta el momento (concentración y superficie) no tienen en cuenta las características de la vegetación, siendo un parámetro fundamental para un correcto ajuste de la dosis. (Koch, 2007; Arnó, 2008; ISPA 2021; Campos, 2021)

La aplicación de fitosanitarios por pulverización es con frecuencia desproporcionada, debido a las diferencias de crecimiento entre plantas en una parcela. Tener en cuenta la variabilidad del campo es de suma importancia y, constituye frecuentemente un problema muy notable por la falta de caracterización de la vegetación y tecnología disponible. La mayor parte de las pérdidas se originan durante el proceso de transporte de gotas y en el impacto sobre la superficie de la vegetación que es muy variable, ya que no se tienen en cuenta sus características, densidad y sus formas geométricas. (Planas, 1990)

Por este motivo la caracterización de la vegetación previa a cualquier actuación relacionada con la aplicación de productos fitosanitarios es imprescindible para asegurar una dosificación y para reducir la contaminación. La tecnología respecto a los sensores que nos ayudan a poder caracterizar la vegetación ha evolucionado en los últimos años, lo que ha permitido encontrar soluciones comerciales que mejoran la implementación y la robustez de estos sistemas. En la agricultura de precisión estos sensores son utilizados para caracterizar y detectar vegetación a partir de diferentes configuraciones y diferentes técnicas de medidas programadas (Gil et al., 2007 y 2013; Llorens et al., 2011; Chakraborty et al., 2019; Cheraïet et al., 2020). Los sensores de ultrasonidos son los más fáciles de implementar en campo, y por otro lado los sensores como, el LiDAR o la fotogrametría aérea requieren de un mayor nivel de desarrollo. Por lo general estos sensores se embarcan en plataformas terrestres o aéreas lo que permite poder monitorizar el cultivo.

Los sistemas de aplicación variable son capaces de ajustar la cantidad de caldo que se aplica de forma automática en función de la variabilidad espacial de la parcela. Esta aplicación se da en tiempo real a partir de información obtenida por sensores embarcados en el tractor o la máquina de aplicación o también por mapas de prescripción establecidos previamente mediante teledetección, por ejemplo. Por último, los nuevos desarrollos intentan cambiar las dos estrategias anteriores para una mejor caracterización de la vegetación.

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

Las operaciones de aplicación de fitosanitarios provocan y presentan pérdidas continuas de producto ya sea por escorrentía sobre la hoja o por deriva. La deriva se define como el movimiento de producto en el aire durante y después de una aplicación. Existen dos aspectos de la deriva, la exoderiva que implica que al momento de la aplicación sale del área del objeto (vegetación) y la endoderiva no alcanza el objeto y cae al suelo, obteniendo como consecuencia la pérdida de producto, la baja eficacia sobre la vegetación, mayor coste de productos y la contaminación ambiental. Las pérdidas de productos dependen mucho de las condiciones de la vegetación, el estado fenológico y la arquitectura de las plantas son las variables más importantes al momento de la deposición y la uniformidad de las aplicaciones de productos agroquímicos y de las condiciones climáticas. (Fillat et al., 2010; (Grella et al., 2017)

La caracterización del dosel de forma electrónica, permiten la implementación de técnicas de aplicación variable en frutales y viñedos, mediante las cuales se modifican las tasas de aplicación de plaguicidas según las características del cultivo. En todos los casos, todos los métodos propuestos lograron ventajas relevantes en términos de reducción de dosis, control de deriva y deposición uniforme. En el caso especial de los viñedos, el grupo de investigación de la Unidad de Maquinaria Agrícola de la Universidad Politécnica de Cataluña ha desarrollado un prototipo de pulverizador que puede aplicar una cantidad variable de líquido a lo largo de la hilera de plantas, en función de la variabilidad de la copa. Los resultados mostraron un potencial de ahorro medio del 21,9%. Hubo un mayor potencial de ahorro en las áreas estrechas del dosel, donde el ancho del dosel era inferior a 0,22 m, lo que resultó en un ahorro promedio del 31, %. Para áreas con un ancho de copa de más de 0,22 m, este valor se redujo a un promedio del 12,5%. Estos resultados mostraron una respuesta prototípica similar que era independiente de la variación del dosel; En cambio, estuvo influenciado por la etapa de cultivo y la posición del sensor.

Siguiendo esta línea, la UE en su línea estratégica del Horizonte 2020, financió el proyecto OPTIMA, en el que se desarrolló, probó y validó un pulverizador inteligente para viñedos, manzanos y cultivos bajos. Estos pulverizadores fueron equipados con una unidad de control de pulverización GPS que permite gestionar en tiempo real la activación de cada boquilla individual y el ajuste de la presión de funcionamiento, con el fin de adaptar el volumen de pulverización según una decisión tomada en función de las características del dosel. (Zaman et al., 2004; Balsari et al., 2008; Doruchowski et al., 2009; Llorens et al., 2010; Escolá 2010; Escolá et al., 2013; Gil et al., 2013)

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

Conocer la geometría de las plantas tanto su tamaño, volumen, forma, como también su estructura, es decir el índice de área foliar y densidad foliar, son claves para optimizar el volumen de aplicación. Por ello se realizó un estudio a largo plazo en un huerto de olivos, con el objetivo de probar las respuestas de los árboles a diferentes sistemas de riego y estrategias de fertilización, posteriormente para caracterizar las copas de los árboles se integró un sensor LiDAR 2D y un GNSS1200 + (Leica Geosystems AG, Heerbrugg, Suiza), Sistema RTK-GNSS (una cinemática en tiempo real global sistema de navegación por satélite que recibe señales de constelación GPS y Glonass). Ambos estaban conectados a un portátil resistente adecuado para trabajar en condiciones de campo. El sistema de adquisición utilizó un Programa de LabVIEW (National Instruments, Austin, EE. UU.) Que fusiona y almacena coordenadas y datos LiDAR. Como una de las herramientas de caracterización geométrica de dosel, los puntos fueron transferidos y almacenados en coordenadas polares relativas con el origen en el centro del sensor. Posteriormente se procesaron y se extrajo datos con la nube de puntos como información geométrica y estructural del árbol, (es decir, altura, ancho y volumen) y sobre el dosel estructura (es decir, penetrabilidad de la luz, frondosidad y porosidad). (Escolá et al., 2017)

La superficie del follaje se estima mediante la medición del volumen que se calcula directamente a partir de los datos obtenidos con un LIDAR y se extrapolará la superficie foliar mediante algoritmos sencillos y fáciles de utilizar, estos permiten un funcionamiento en tiempo real. Los resultados obtenidos demuestran que en las plantaciones de perales hay una relación entre el volumen y el follaje, interpretándolo como lineal con un coeficiente de variación de  $R=0,81$ . (Palacín et al., 2007)

La **UMA** tiene gran experiencia especialmente en el ámbito de la tecnología de aplicación de productos fitosanitarios, manteniendo estrecha relación con las principales empresas del sector (fabricantes de maquinarias, organizaciones agrícolas y compañías agroquímicas).

Además, por su amplia experiencia científico-técnica y desarrollo de altas tecnologías, forma parte de diversos proyectos de la Unión Europea, Financiados por el programa Horizon 2020.

- Proyecto (**INNOSETA**) siendo su principal objetivo establecer una red temática autosostenible e innovadora sobre la protección de cultivos y el uso sostenible de productos fitosanitarios, y la participación en el proyecto.
- Proyecto (**OPTIMA**), cuyo objetivo es desarrollar equipos inteligentes de aplicación de fitosanitarios que permitan un uso seguro de los productos.

En el presente proyecto la UMA ha desarrollado el equipo Smart Sprayer para manzanos capaz de realizar una aplicación variable adaptada a las características de la vegetación, siendo este un equipo inteligente.

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En  
Plantaciones De Manzano*

Los excelentes resultados de este proyecto han permitido poner el Smart Sprayer al mercado totalmente conectado a la nube, capaz de realizar una trazabilidad completa del proceso de aplicación, identificando de forma precisa los parámetros reales de la aplicación, facilitando la gestión de los recursos y mejorando el proceso global para una producción de fruta más racional, razonable, económica y sostenible. (Gil, 2009)

Para finalizar con lo expuesto, diversos estudios ponen en manifiesto que la utilización excesiva e inexacta de plaguicidas y fertilizantes, traen consigo diversas consecuencias como resistencia de las plagas o enfermedades o la alta residualidad de fertilizantes y plaguicidas en alimentos y para ello la Unidad de Mecanización Agraria creo una aplicación (DOSAVIÑA) destinada a los agricultores, que les permite determinar fácilmente las cantidades y volúmenes óptimos de producto fitosanitario para una aplicación en Viñedo.

## **2. Objetivos**

El objetivo principal de este proyecto ha sido la evaluación y caracterización de un sensor de ultrasonidos como elemento para la caracterización y cuantificación de la masa vegetal en una plantación de manzanos y su relación con la determinación de la dosis óptima de producto fitosanitario.

Como complemento a este objetivo general, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- Evaluar la adecuación del sensor de ultrasonidos para la determinación de la anchura de la masa vegetación.
- Evaluar la capacidad del sensor de ultrasonidos para estimar un índice para la caracterización de la densidad de vegetación.
- Establecer la calibración adecuada del sensor para una caracterización óptima de la vegetación.
- Validar los resultados obtenidos durante la medida de una vegetación artificial en varias plantaciones reales de manzanos.

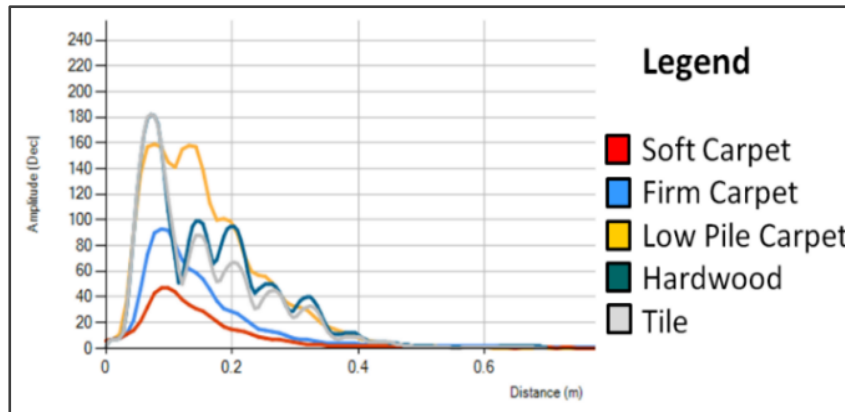
### 3. Materiales y métodos

A continuación, se describirá los materiales utilizados para la toma de datos y los métodos utilizados para la caracterización de los dos tipos de vegetación.

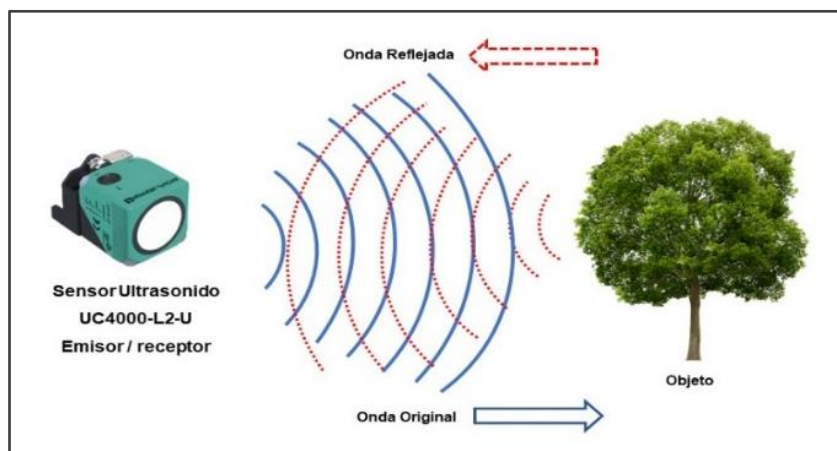
#### 3.1 Sensores de Ultrasonidos

##### 3.1.1 Especificaciones técnicas de los sensores

Los sensores de ultrasonidos usan ondas por encima de los 20 kHz para poder medir las distancias y detectar la presencia de objetos (sólidos o líquidos) (**Figura 2**) sin hacer contacto con los mismos (**Figura 3**). Disponen de una configuración variable de la anchura del campo del sonido ultrasónico, y la respuesta del sensor puede variar según la temperatura y las condiciones climatológicas en las que está expuesto. (Toa & Akeem, 2020)



**Figura 2:** Detección Ultrasónica del Tipo de Superficie. Fuente: Fundamentos de la Detección por ultrasonido (Toa & Akeem, 2020)



**Figura 3:** Mediciones Ultrasónicas Emisor / Receptor

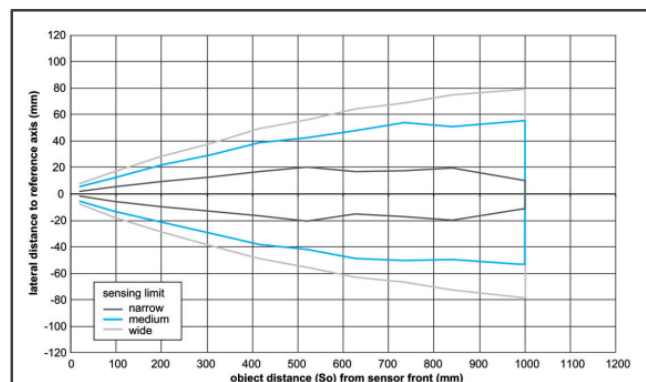
*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

Las principales ventajas de los sensores de ultrasonidos es que son inmunes al ruido industrial, tienen una fácil auto calibración para velocidad del cambio de sonido, posee una medición de precisión de alta velocidad, y son es muy flexibles en la instalación. (Pallas, 1992)

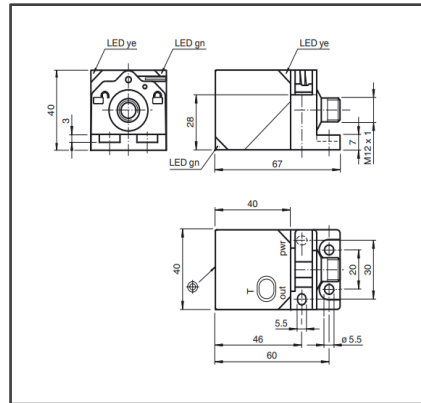
Uno de los parámetros del sistema de detección por ultrasonidos es el número de pulsos, esto los definimos como el número de impulsos transmitidos por el transductor, que cuanto mayor sea el número de pulsos, mayor será la presión sonora (SPL), pero el rango mínimo de detección será menos optimo. En cuanto al ultrasonido tiene un rango efectivo variable dependiendo del modelo, además la capacidad de detección viene dada, entre otros parámetros, por la medida del cono que generan. Este cono tendrá un tamaño de impacto distinto dependiendo del ángulo del mismo, pero también de la distancia a la que se encuentre el objeto a medir. (**Figura 4**)

**Especificaciones generales:** en los elementos de indicación y manejo, se detecta la operatividad del sensor de tres maneras, LED verde cuando este se encuentra en de funcionamiento, LED amarillo cuando se encuentra un objeto en rango de evaluación (lectura) y LED rojo nos indicara que existe un error en la programación, en la **Figura 5** podemos ver la forma de manejo del sensor.

Asimismo, el sensor está fabricado con un plástico reforzado, el transductor suele tener una mezcla de resina epoxi / esfera de vidrio hueca con espuma de poliuretano. Todo esto, hace que este tipo de sensores industriales sean aptos para el uso agrícola, mucho más duro por sus condiciones de temperatura, irradiación solar, agua y polvo.



**Figura 4:** Configuraciones del Sensor. Fuente: (Baumer, 2021)



**Figura 5:** Dimensiones y elementos de indicación de manejo. Fuente: (Ultrasonic Sensor, 2019)

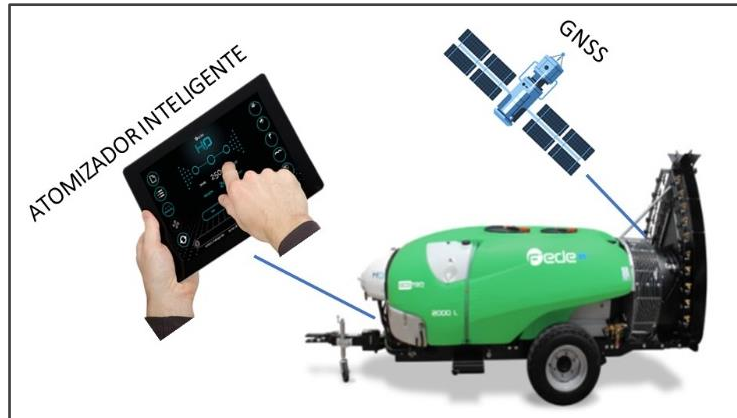
### 3.1.2 Diseño del sistema de adquisición de datos

Para los ensayos de este proyecto se utilizaron seis sensores ultrasónicos modelo UC4000-L2-U-V15, configurados con un rango de detección 500 mm hasta los 3000 mm. En ambos ensayos se configuro la anchura del sensor en tres variedades: Narrow Beam, Medium y Wide. Aparte el sensor permitía hacer un primer filtraje de las señales recibidas, para estos ensayos se configuró con el Average 5-2, este método de filtraje envía 5 señales, recoge dos que tengan mas amplitud y hace una media.

Para los ensayos, tanto de laboratorio como en campo, los sensores se montaron sobre un pulverizador de la marca Fede (Pulverizadores Fede SL, Cheste, España) que se ha convertido en un prototipo inteligente para la aplicación en manzanos desarrollado bajo el marco del proyecto H2020 Optima proyecto. **(Figura 6)** El pulverizador tiene unas, dimensiones de anchura de 1,57 m, longitud 3,23 m y una altura de 1,5 m, con una capacidad del tanque de 2000 litros, está equipado con 20 boquillas individuales y regulables (10 boquillas en cada lado de la maquina), lo que le permite aplicar en dos hileras al mismo tiempo, tiene volumen de aire de 55,000 m<sup>3</sup>/h, utiliza una bomba FDH 120 y posee un sistema integrado inteligente H30. Sobre el pulverizador, en la parte frontal, se colocó un mástil en el que se montaron 6 sensores de ultrasonidos a tres alturas distintas. El primer par de sensores sensor se colocó a una distancia de 1.2 m de la barra de tiro del pulverizador, el segundo par se colocó a 2.3 m, y el tercer paro a 3 m de altura.



*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*



**Figura 6:** Pulverizador Inverter Qi 9.0 (FEDE) con Tecnología H30, - Proyecto H2020.

Los sensores de ultrasonido devuelven un voltaje analógico variable de 0 a 10 V dependiendo de la distancia a la que se encuentre el objeto medido. Este voltaje se convertirá en digital mediante el ADC y de este conversor, mediante una comunicación SPI, se envían los datos a un sistema de adquisición un controlador en Raspberry Pi 4B. El software utilizado para programar todo es sistema de control fue Pycharm (desarrollado por la empresa checa JetBrains), el cual es una plataforma donde podemos programar en lenguaje Python. Para poder transformar los voltajes medidos a una distancia en unidades del sistema internacional, se requiere una calibración previa de los sensores de ultrasonidos.

La calibración se llevó a cabo sensor por sensor, y en este proceso se generó una recta de regresión lineal en la que se relacionaron los voltajes medidos y la distancia variable de un objeto de calibración. El objeto utilizado fue una superficie plana de cartón de aproximadamente  $1\text{m}^2$  la cual se colocando a distintas distancias de forma incremental desde el mínimo rango de lectura del sensor es de 400 mm hasta la máxima distancia de lectura 3000 mm. A la vez que se iba moviendo la superficie de calibración, se iban recabando los datos del voltaje de los sensores. Con todo esto, se obtuvo una recta de calibración con un coeficiente  $R^2 = 0,99$  descrita por la ecuación  $y = 0.25 x + 0,5$  en el que el valor de la x es el voltaje medido arrojado por el sensor. **(Gráfico 1)**

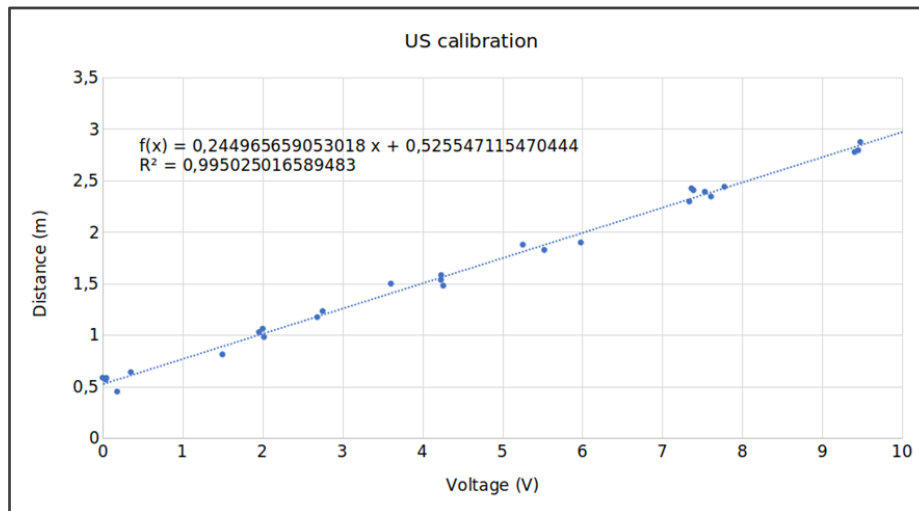


Gráfico 1: Recta de calibración

### 3.2 Ubicación de los ensayos

En este proyecto se llevaron a cabo dos ensayos en localizaciones distintas. Los primeros ensayos de laboratorio en los que se trabajó con vegetación artificial se realizaron en las instalaciones de Agrópolis de la Unidad de Mecanización Agrícola situado en Viladecans. El segundo ensayo, se realizó con vegetación natural se llevó a cabo en dos fincas de manzanos situadas en Épila (Zaragoza, España). La primera finca se denomina Agro Erruz y la segunda El Paso.

#### 3.2.1 Vegetación Artificial

Para el ensayo de laboratorio se utilizaron arboles generados a partir de mástiles de madera y hojas artificiales de plástico. Esto nos permitió poder modificar sus características estructurales y morfológicas, adaptándolo a diferentes situaciones para la presente investigación. En este ensayo se caracterizó la estructura del árbol artificial, tomando datos y mediciones de la anchura, altura de la vegetación ( $C_w$  y  $C_h$ ), y la densidad foliar.

Esto se realizó para establecer las comparaciones entre los datos extraídos por los sensores y las medidas manuales que se consideraron como el valor real y más fiable. De esta forma se pudo evaluar la fiabilidad del sensor, su eficacia y rendimiento. Otro de los parámetros obtenidos de forma manual fue la densidad media de la vegetación, que nos sirve para determinar el Índice de Área Foliar (LAI) y con ello obtener las equivalencias del estado vegetativo, lo cual es una variable fundamental para estudiar el desarrollo y crecimiento de cultivos. El valor de LAI relaciona la superficie foliar en cada metro cuadrado de suelo. **(Ecuación 1)**

$$LAI = \frac{\text{Superficie Foliar (m}^2\text{)}}{\text{Área del Suelo (m}^2\text{)}}$$

**Ecuación 1:** Calcular LAI

Se caracterizó la cobertura para saber el área foliar utilizando la metodología basada en distintos estudios en los que ha participado el grupo de la UMA (Gil et al., 2014; Gil et al., 2015; y Miranda Fuentes et al. 2015).

Para poder extraer la superficie foliar de la vegetación se empleó un medidor de área de hojas LE-3100 Leaf Area Meter (LI-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, Estados Unidos).

Los árboles artificiales se fabricaron siguiendo una estructura de madera para simular una vegetación real, donde las uniones se realizaron con tuberías de hierro, que permitieron reforzar más la estructura. Se pensó también diseñar una base estable que permitiera realizar los estudios en todo tipo de clima o ambiente, fabricada con tablones de madera de 1,4 m de longitud colocado en forma de cruz para asegurar estabilidad en todas sus orientaciones. Además de una estructura sólida, los árboles diseñados permiten la modificación de las ramas artificiales, insertadas sobre el tronco principal, y en ellas incrustadas los distintos ramilletes de hojas de plástico. Esto hizo posible la variación tanto del número de ramas como de ramilletes y hojas para conseguir árboles de distintas características en cuanto a densidad foliar. (**Figura 7**) (Palau, 2019)



---

**Figura 7:** Árboles artificiales. Fuente: Desarrollo De La Metodología Para La Evaluación De La Distribución De Fitosanitarios Generada Por Un Atomizadores Utilizando Vegetación Artificial. (Palau, 2019)

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

Se utilizaron un total de cinco arboles artificiales de 3,5 metros de altura, cada árbol tiene un total 140 ramas de plástico con 42 hojas cada una. Disponen de una anchura de vegetación de 0,86 m, aunque como la lectura de los sensores se lleva a cabo solamente por un lado de la vegetación, se midió también la mitad del árbol (desde el tronco hasta la parte más externa de la vegetación) el cual tuvo una media de 0,43 cm. Por otro lado, cada hoja tiene un área media de cada hoja de 22,7 cm<sup>2</sup>.

Se utilizaron tres configuraciones distintas del árbol para lograr tres densidades en los ensayos de laboratorio: la primera se realizó con el 100% de vegetación, el cual cada árbol tenía 140 ramas con 42 hojas cada una (con un LAI de 1,67), la segunda se realizó con 112 ramas, simulando un 75% de vegetación (corresponde a un LAI de 1,31) y la tercera con 63 ramas simulando una vegetación al 50% de densidad vegetativa, que corresponde a un LAI de 0,75.

Para la validación de los sensores y caracterización de la vegetación se colocaron los cinco árboles artificiales en filas a una distancia de 1,5 m cada uno y se simulo un ancho de calle de 4 m.

El tractor con el pulverizador acoplado y con los sensores a 3 alturas, pasó tomando las lecturas de la vegetación a una velocidad de 5 km/h. **(Figura 8)** En este ensayo en vegetación artificial solo se utilizó la configuración de los sensores en Narrow Beam, que genera un cono de lectura de menor dimensión y por otro con una mayor capacidad de penetración en las zonas donde no hay vegetación, con un máximo de lectura de 2000 mm. Las muestras recolectadas fueron de una sola fila y se repitieron 3 veces los ensayos con 3 diferentes densidades de la vegetación artificial. **(Tabla 1 y 2)**



**Figura 8:** Primer ensayo de Laboratorio con Vegetación Artificial

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

<b>Tabla 1:</b> Parámetros de densidad de la Vegetación Artificial.						
Densidad	N.º ramas	N.º Hojas	Distancia x anchura de calle (m)	Área de Suelo m <sup>2</sup>	Superficie Foliar m <sup>2</sup>	LAI
High (100%)	140	5880	1.5 x 4	6	13,34	2,22
Medium (75%)	112	4683			11,63	1,93
Low (50%)	63	2657			6,03	1,00

<b>Tabla 2:</b> Configuración para la Validación y caracterización					
Narrow Beam (average 5.2)	Voltaje (V)	Medición min. (m)	Voltaje (V)	Medición máx. (m)	Velocidad Avance (km/h)
	0	0,4	10	2	5

### 3.2.2 Vegetación natural (Cultivo de manzanos)

Después de trabajar con vegetación artificial, se trasladó el sistema de ultrasonidos a dos plantaciones comerciales de manzanos situadas en Épila (Zaragoza, España). Para estos ensayos se utilizaron los seis sensores instalados en la máquina de pulverización caracterizados como secciones (US1, 2, 3, 4, 5, 6) y se realizaron 3 repeticiones de las lecturas de campo con 3 tipos de configuraciones del sensor. La primera lectura se realizó con la configuración Narrow Beam la segunda con Medium y la tercera con Wide. (**figura 9, tabla 3**)



**Figura 9:** Ensayo con Vegetación Real (Epila, Zaragoza)

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

<b>Tabla 3:</b> Configuración para la validación y caracterización					
Configuración	Voltaje (V)	Medición min. (m)	Voltaje (V)	Medición máx. (m)	Velocidad Avance (km/h)
Narrow					
Medium	0	0,4	10	3	4km/h
Wide					

En la **tabla 4 y 5** se detallan las características de los árboles de cada una de las plantaciones en las que se realizaron los ensayos, con los cuales posteriormente se realizará una comparación con los datos obtenidos con el sensor.

<b>Tabla 4:</b> Medidas de la Vegetación en estado BBCH 72. F. del ensayo 10/05/2021		
Parámetros	Erruz	El Paso
Altura Vegetación (m)	2,4	2,2
Anchura Vegetación (m)	1,4	95,9
Anchura medio árbol (m)	0,70	0,48
Distancia de Calle (m)	4,5	4,16
Distancia entre árbol (m)	1,62	1,36

<b>Tabla 5:</b> Parámetros de densidad de la Vegetación Natural		
Datos	Erruz	El Paso
Prom. Ramas por árbol	21	25
Prom. Hojas por árbol	10,942	3,580
Área de suelo m <sup>2</sup>	7,3	5,7
Área Foliar m <sup>2</sup>	14,8	13,1
LAI	2,02	2,3

#### **4. Análisis de datos**

Los datos se procesaron en el entorno Excel de Microsoft®. Para la determinación del número de huecos en la vegetación, se utilizó la siguiente operación lógica que se aplicó en cada una de las lecturas del sensor a la frecuencia de trabajo (en sus tres configuraciones y las distintas caracterizaciones de la vegetación):

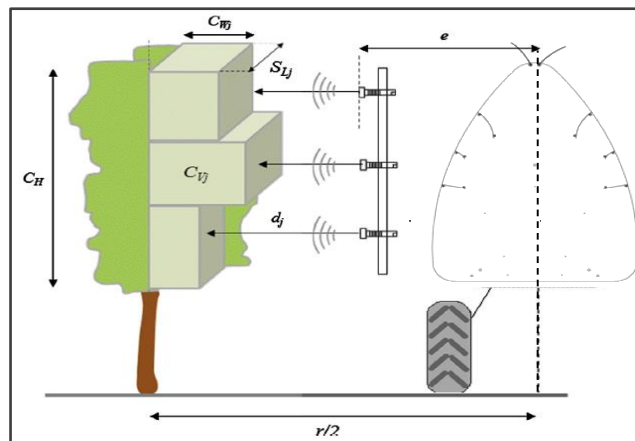
Si  $HCw \geq 10$  cm → Resultado lógico 0 (no existen huecos en la vegetación)

Si  $HCw \leq 10$  cm → Resultado lógico 1 (existe un hueco en la vegetación)

donde HCw es la mitad del ancho de la vegetación, calculado a partir de la medida fija de distancia entre hileras (DH), el desplazamiento del sensor en referencia al eje central de la máquina y el valor aportado por la lectura del sensor (MS) siguiendo el diagrama de la **figura 10** y la **ecuación 2**.

$$HCw = \left( \frac{DH}{2} - e - MS \right)$$

**Ecuación 2:** Hallar la mitad de la anchura de la Vegetación



**Figura 10:** Modelo de lectura del Sensor

Con el fin de validar las distintas configuraciones de los sensores de ultrasonidos para caracterizar la vegetación, se utilizó el coeficiente de variación (CV) para poder demostrar si existe gran variabilidad en las muestras y que tan dispersas pueden ser. El coeficiente de variación relaciona la desviación estándar de las muestras con su promedio, y los rangos establecidos para comparar dicha dispersión se recogen en la **tabla 6. (Ecuación 3)**

$$CV = \frac{\sigma_x}{|\bar{X}|}$$

**Ecuación 3:** Coeficiente de Variación

<b>Tabla 6:</b>	Valores del Coeficiente de Variación
<b>Rango</b>	<b>Clasificación</b>
<b>Cv ≤ 0.1</b>	V. Muy Baja
<b>0,1 ≤ 0.25</b>	V. Baja
<b>0.25 ≤ 0.4</b>	V. Normal
<b>0.4 ≤ 0.5</b>	V. Alta
<b>0.5 ≤ 1</b>	V. Excesiva

## 5. Resultados y discusión

### 5.1 Vegetación Artificial

El sensor hizo un total de 2400 lecturas por ensayo en la hilera de vegetación representada por los cinco arboles artificiales. Para este tipo de ensayo en el que se varió la densidad de vegetación, pero se mantuvo la configuración del haz del sensor a Narrow Beam (Average 5.2), se observa que en general los sensores perciben que las medidas de vegetación (la mitad de la anchura del árbol) oscilan entre 0,29 y 0,35 m. (**Tabla 7**) Esto, si lo comparamos con las medidas manuales que se tomaron como referencia, encontramos que el sensor no llega nunca al ancho medido de 0,43 m. Esta desviación se debe la densidad de la vegetación y al ancho de cono estrecho. Por otro lado, tal y como era de esperar, cuanto menor es la densidad de vegetación, mayor es el número de huecos, aunque entre las densidades Medium y Low no se genera una gran diferencia, o por lo menos no equivalente al descenso de densidad entre las dos configuraciones de árbol. Cabe destacar que, al trabajar con un haz del sensor con una huella muy pequeña, es muy fácil que el sensor no encuentre respuesta en situaciones de poca vegetación. En la tabla también podemos observar que el coeficiente de variación de la densidad High con un 28,7% siendo inferior al de la densidad Medium que es de 34,8 % y existiendo una similitud con la densidad Low que es de 34,7%, lo que significa que existe una variabilidad normal y que están dentro de los rangos  $0.25 \leq 0.4$

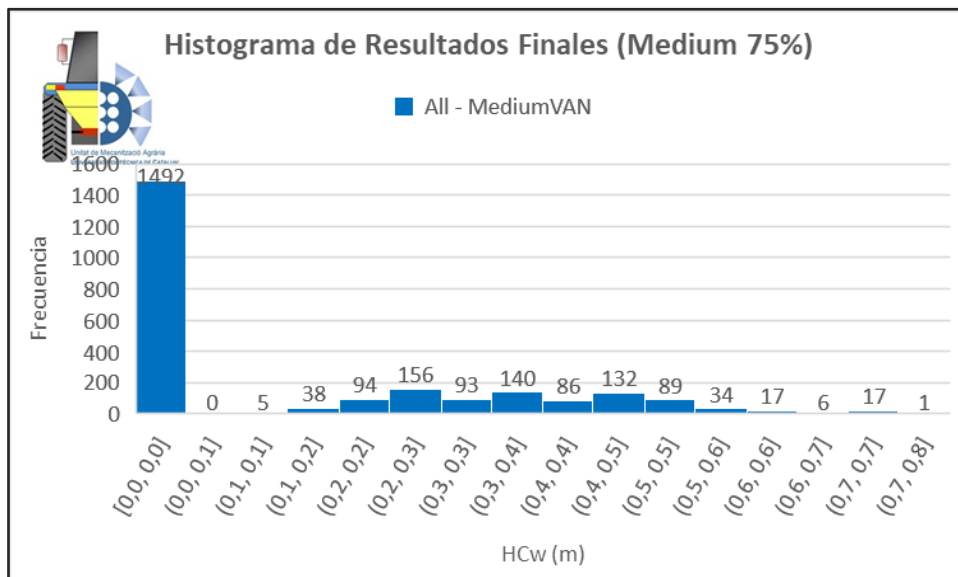
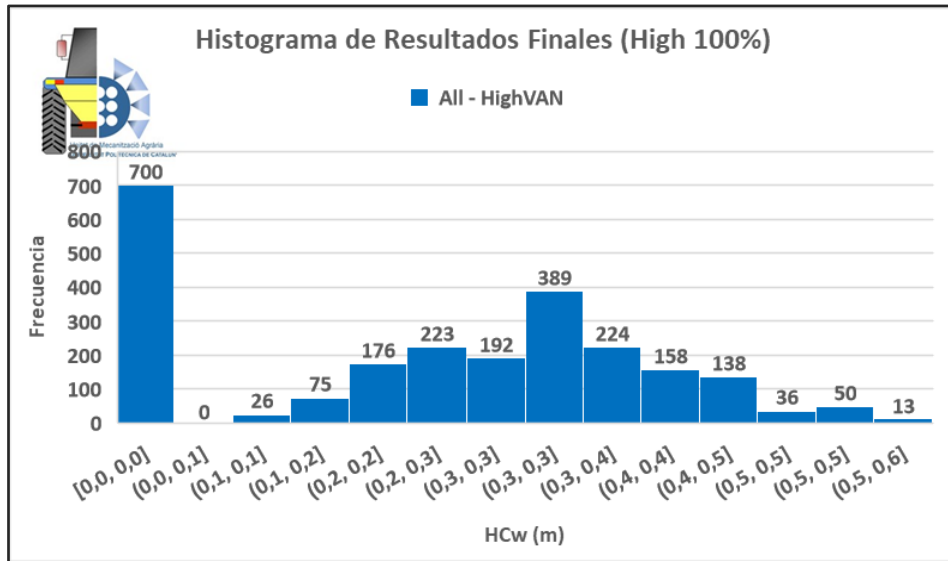
**Tabla 7:** Resumen y parámetros analizados de la Vegetación artificial (Densidad High, Medium, Low) con la configuración Narrow Beam

Valores	High D.	Medium D.	Low D.
<b>LAI</b>	1,67	1,31	0,75
<b>Máximo HCw</b>	0,49	0,68	0,51
<b>Promedio HCw</b>	0,31	0,35	0,29
<b>N.º Huecos</b>	233	497	527
<b>% Huecos</b>	29,2%	62,2%	65,8%
<b>N.º Vegetación</b>	567	303	273
<b>% Vegetación</b>	70,8%	37,8%	34,17%
<b>Varianza</b>	0,01	0,02	0,01
<b>Desv. Estándar</b>	0,09	0,12	0,10
<b>Cv</b>	28,7%	34,8%	34,7%
<b>Variabilidad</b>	V. Moderada	V. Moderada	V. Moderada
<b>Error Típico</b>	0,07	0,09	0,09

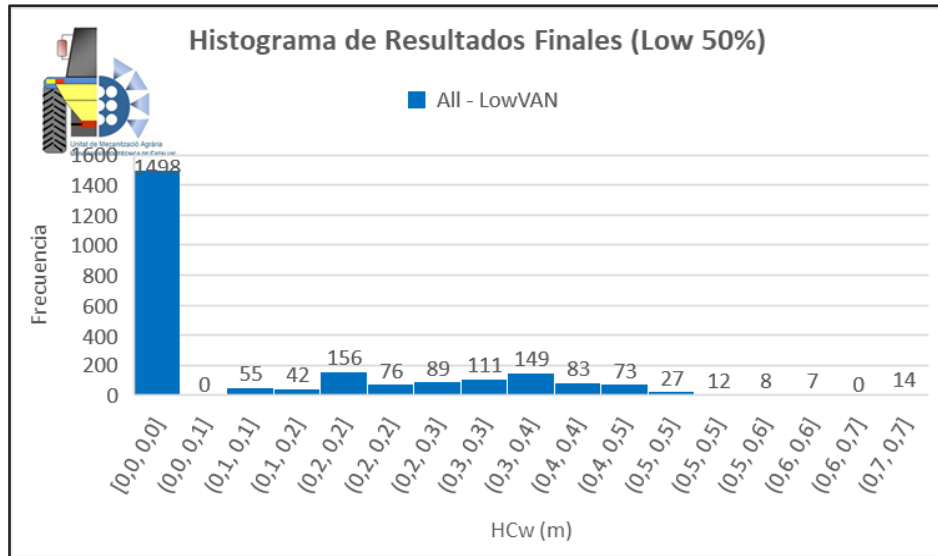


*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

El **gráfico 2** nos muestra la forma en cómo se reparten los valores de HCw calculados a partir de las lecturas del sensor de ultrasonidos. Tal y como se estableció, todos los impactos que daban un ancho de vegetación igual a 0, se estimaron como huecos. Sorprende ver como para las densidades media y baja los histogramas de frecuencias son altamente similares, y que, a pesar de una disminución importante del número de hojas, las lecturas del sensor no se ven afectadas. Todas las medidas resultantes que no son consideradas como huecos, siguen una distribución muy aproximada a la normalidad.

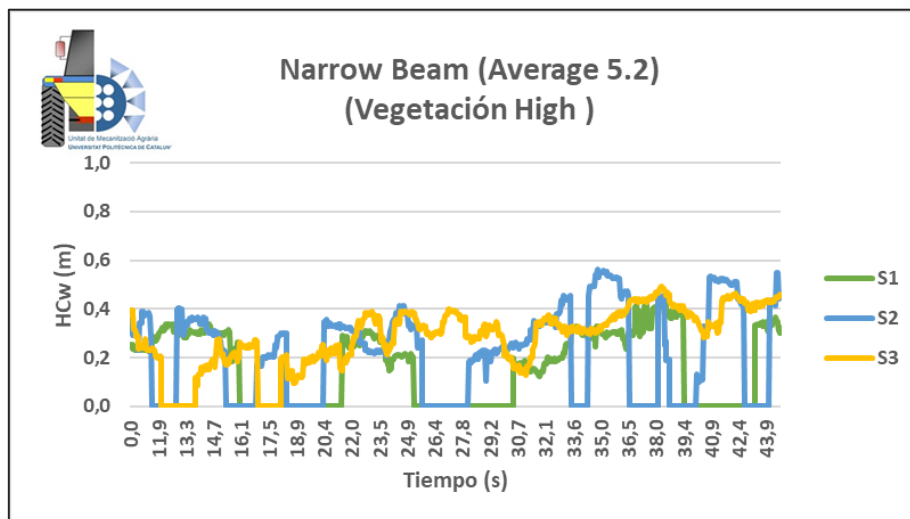


Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano

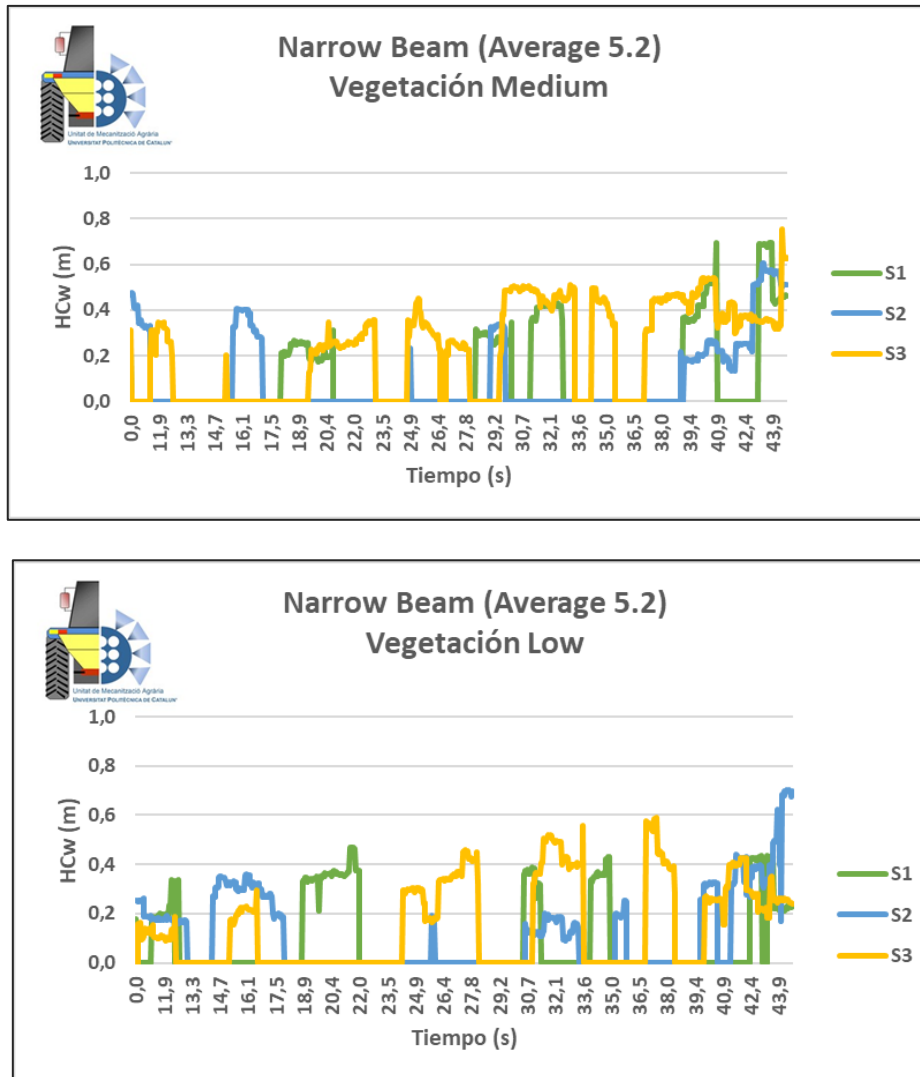


**Gráfico 2:** Histogramas de Frecuencias de la vegetación artificial en las tres configuraciones de densidad del árbol.

En el **gráfico 3**, se ratifica que, utilizando Narrow Beam como configuración del sensor, las diferencias entre la respuesta de la máxima vegetación y las densidades media y baja es muy notable, pero no lo es cuando comparamos estas últimas dos densidades entre sí.



Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano



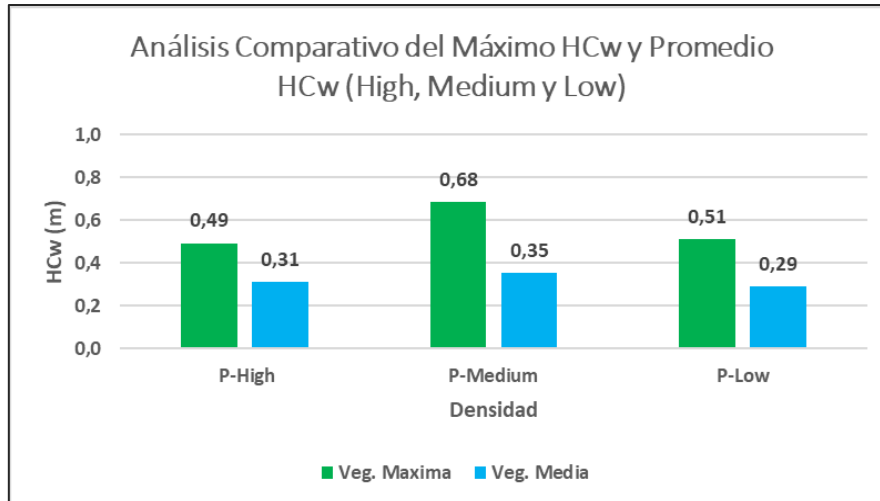
**Gráfico 3:** Respuesta de los sensores del lado derecho de la máquina a 3 alturas en la Vegetación Artificial

En el **gráfico 4** observamos valores medios y máximos, de cada densidad medida con los sensores. Estos valores muestran que la densidad High tiene un alcance medio de 0,31 cm, en comparación con la media obtenida de forma manual en campo que es de 0,43 cm. El cual nos indica que el sensor realizó una lectura del 72% del total del HCw real, esto se debe a la alta densidad de vegetación lo que no permite un alcance más óptimo de lectura.

En cuanto a la densidad Medium que representa el 75% de vegetación, muestran como valores de alcance 0,35 cm lo que nos indica que el sensor ha realizado una lectura del 81,4% del HCw real.

Por otra parte, la densidad Low que representa una vegetación del 50%, se obtuvieron valores medios de 0,29 cm representando este el 67,4% del HCw real.

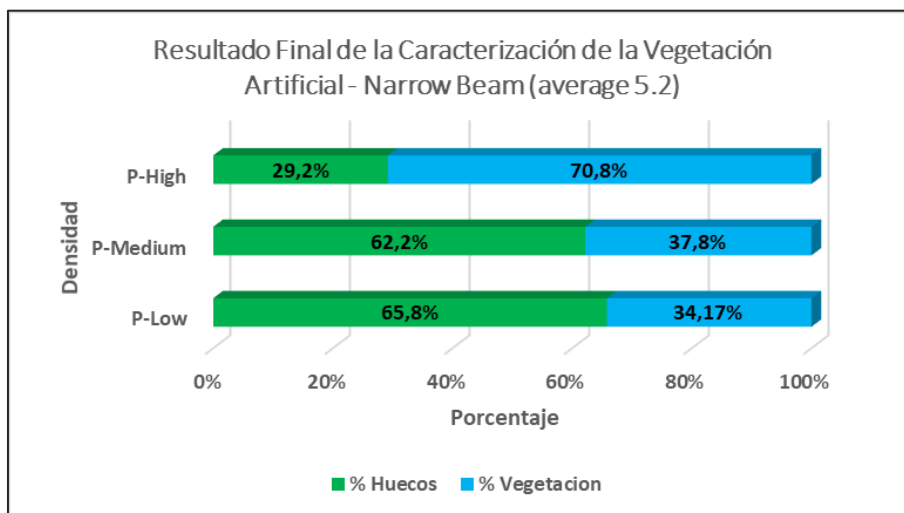
Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano



**Gráfico 4:** Análisis comparativo de los valores HCw máximos y medios de la vegetación artificial.

Los resultados finales expuestos en el **gráfico 5**, nos muestra el porcentaje de huecos y el porcentaje de vegetación, con estos datos damos a conocer que la densidad High muestra un 70,8 % de vegetación y un 29,2 % de huecos, lo que podemos determinar el sensor de ultrasonido configurado como Narrow Beam (average 5.2) es capaz de caracterizar vegetaciones muy densas.

Por otra parte, la densidad Medium simulada con 75% de vegetación nos muestra un 37,8% de vegetación y un 62,2% de huecos, teniendo valores similares en la densidad Low simulada al 50% de vegetación de un árbol, este nos da un 34,17% de vegetación y 65,8% de huecos que debido a la baja densidad de vegetación la configuración utilizada de cono estrecho no es el apropiado ya que se obtienen más porcentajes de huecos por que se pierden muchas lecturas, además con el cono estrecho no se puede caracterizar una vegetación desuniforme ya que siempre nos dará mayores porcentajes de huecos por tener áreas de escasa vegetación o nulas.



**Gráfico 5:** Vegetación artificial: porcentaje de huecos y vegetación.

## 5.2 Vegetación en fincas comerciales

### 5.2.1 Finca Agro Erruz

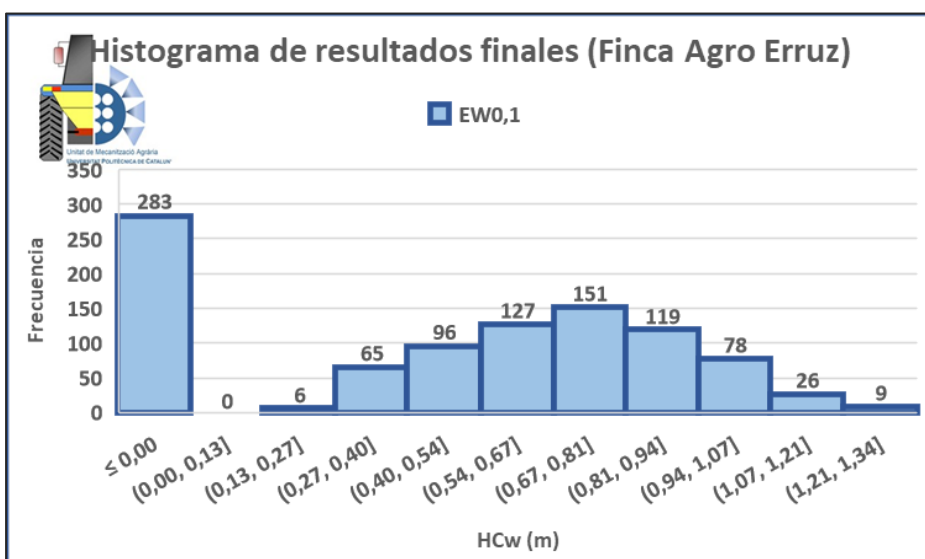
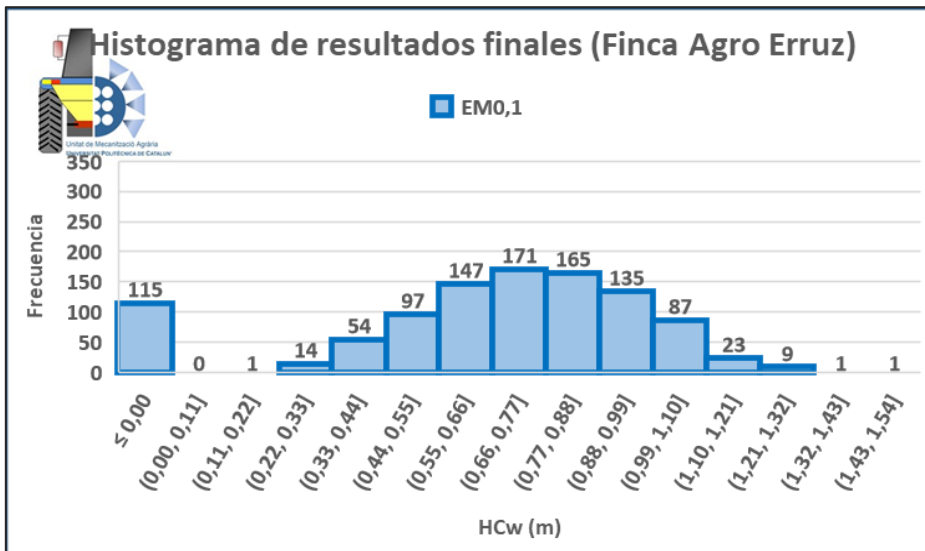
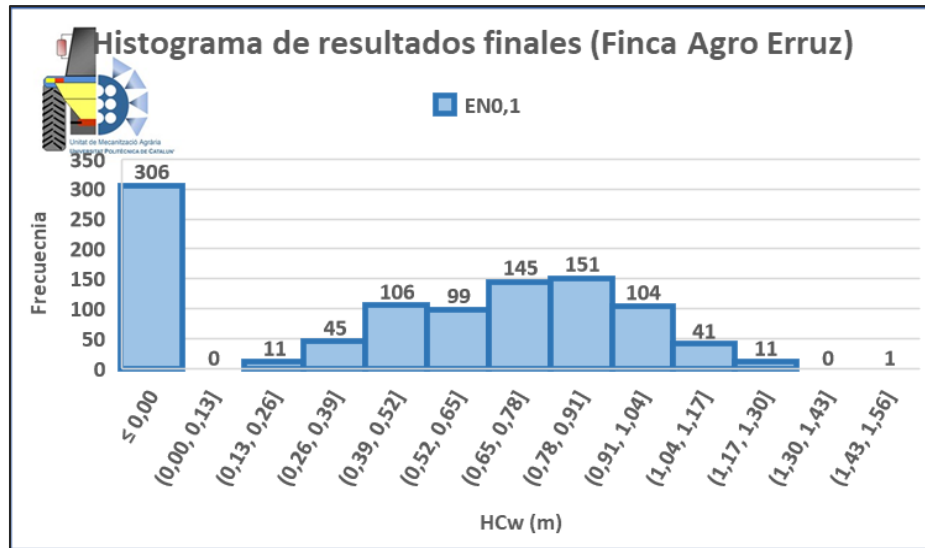
A diferencia con el ensayo mostrado anteriormente, en las fincas comerciales se probaron tres configuraciones del sensor distintas en lo que se refiere al ángulo del haz, sobre una vegetación estándar con una densidad dada. Los resultados en la finca de Erruz muestran que la vegetación medida por los sensores se encuentra en el rango 0,66-0,75 m, lo que correspondería a un ancho de vegetación real del árbol si consideramos simetría de la vegetación de entre 1,32 y 1,50 m. Esto concuerda de una forma muy estrecha con los valores medidos en campo que promedian un ancho de vegetación de 1,4 m. En cuanto al número de huecos en la vegetación (hay que recordar que se trataba de una vegetación con un alto promedio de hojas por árbol) se observa un menor número de huecos detectados cuando se trabaja con una configuración del haz media. Las configuraciones tanto ancha como estrecha del haz dan valores muy similares. Al tratarse de una canopia muy homogénea, es normal que la influencia de la medida del haz de muestreo sea casi imperceptible, ya que sea como sea el haz siempre va a encontrar un objeto (hoja) en una pared vegetal con un número de hojas muy alto. **(Tabla 8)**

**Tabla 8:** Resumen y parámetros analizados de la Vegetación real con la configuración Medium, Narrow y Wide, Agro Erruz.

Valores	Narrow	Medium	Wide
Máximo HCw	1,16	1,28	1,31
Promedio HCw	0,68	0,75	0,66
N.º Huecos	51	19	47
% Huecos	30,0%	11,3%	29,4%
N.º Vegetación	119	151	113
% Vegetación	70,0%	88,7%	70,6%
Varianza	0,03	0,06	0,05
Desv. Estándar	0,18	0,20	0,19
Cv	27,7%	27,3%	29,6%
Variabilidad	V. Moderada	V. Moderada	V. Moderada
Error Típico	0,18	0,20	0,18

Los histogramas de frecuencia muestran una distribución normal de los datos si eliminamos aquellos que nos dan como resultado 0 que son considerados como huecos en la vegetación. **(Gráfico 6)**

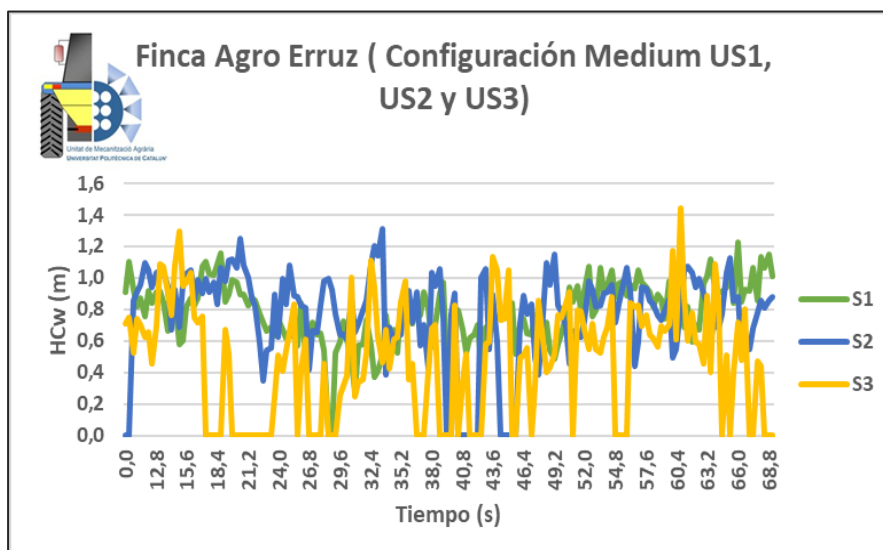
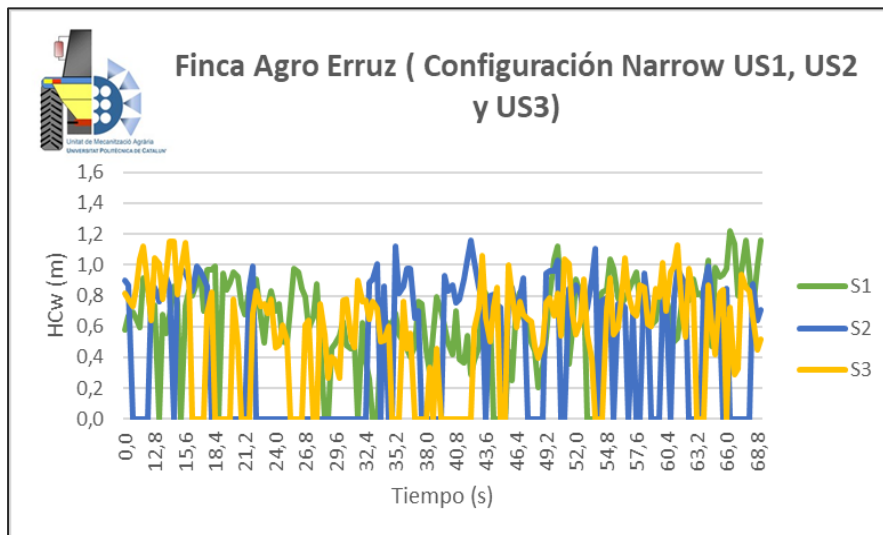
Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano



**Gráfico 6:** Histograma de Frecuencias de la vegetación real Finca Agro Erruz con las tres configuraciones del sensor.

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

Por otro lado, en la vegetación natural, y al disponer de datos de 6 sensores (3 por lado) se quiso determinar visualmente la homogeneidad de las lecturas dependiendo de la configuración del sensor (**Gráfico 7 y 8**). Teniendo en cuenta que una parcela comercial suele disponer de unos árboles con pocas diferencias entre ellos, y que las paredes de vegetación al ser podadas con máquinas de corte de disco son muy similares, se esperan pocas diferencias entre los sensores de un lado y del otro de la calle. Esto se cumple cuando comparamos el HCw promedio de los 3 sensores para el lado derecho e izquierdo de la máquina. Además, **en el gráfico 7 y 8** se puede observar el alto número de huecos recogido por el sensor de la parte superior de la máquina, lo que es de esperar dada la menor vegetación y uniformidad en las partes altas de la pared de vegetación. Por lo que se refiere a las partes centrales del árbol (S1 y S2), las líneas son mucho más continuas cuando se utiliza el sensor con la configuración Wide que en el caso del Narrow, en donde se observan mayores valores de 0 (huecos) en la vegetación.



Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano

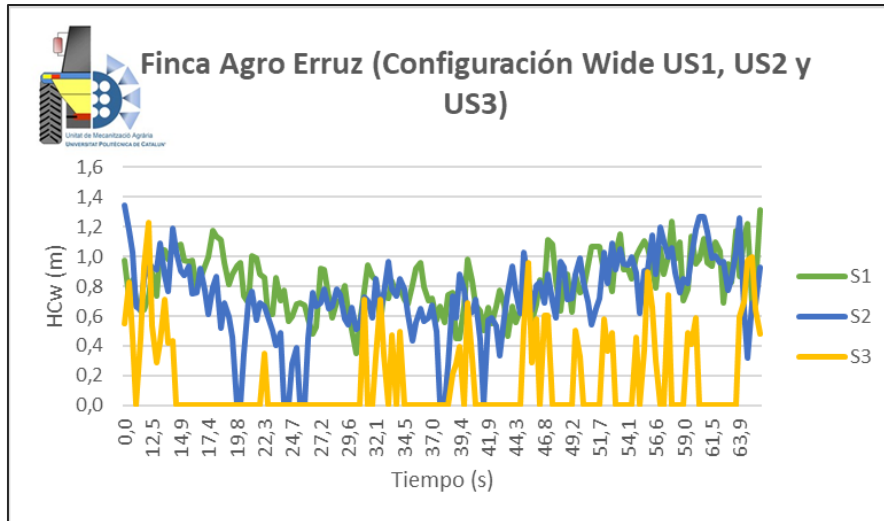
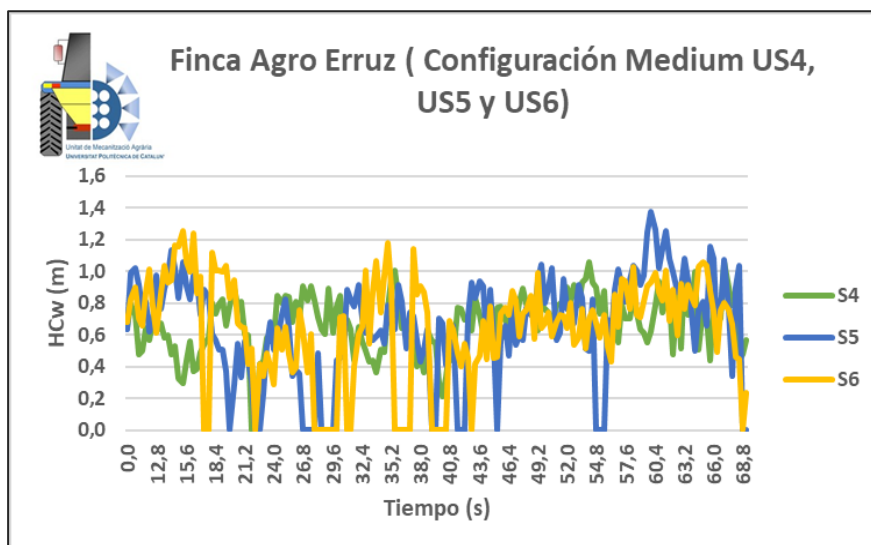
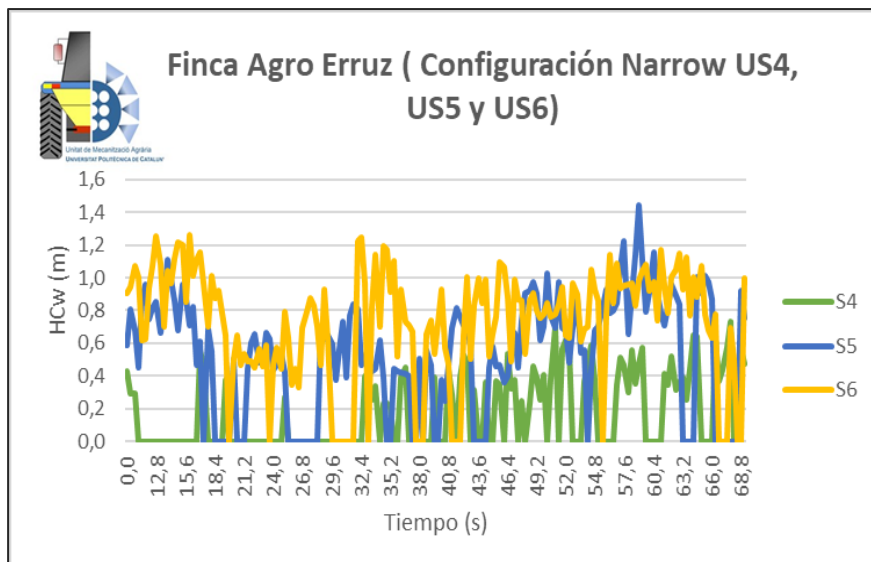
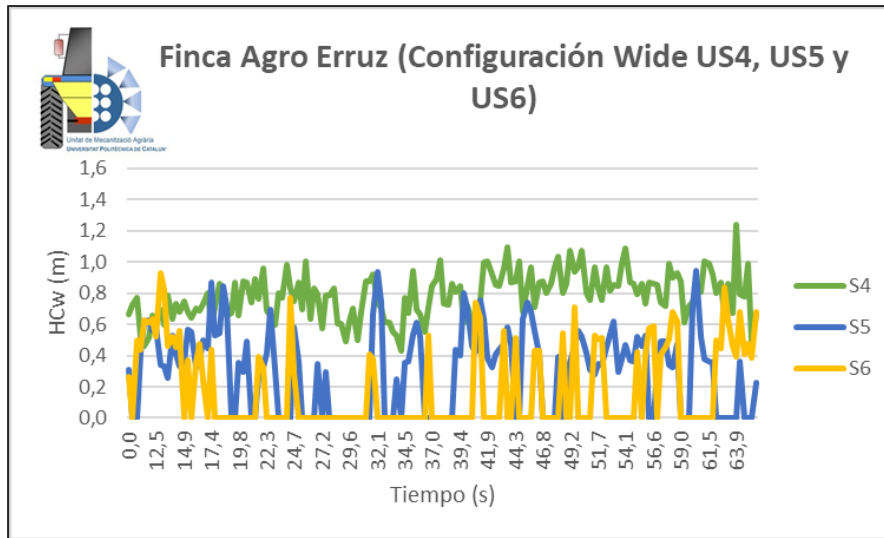


Gráfico 7: Respuesta de los sensores del lado izquierdo de la máquina a 3 alturas en la Finca Agro Erruz



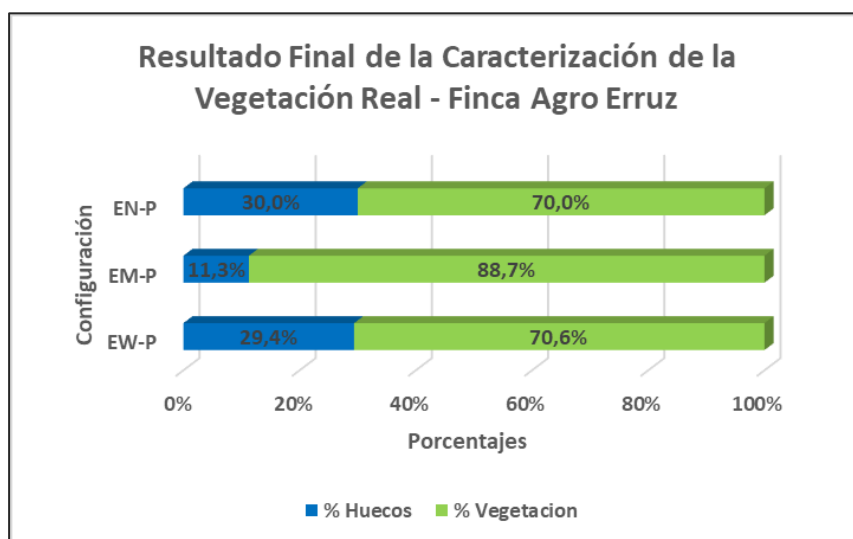


Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano



**Gráfico 8:** Respuesta de los sensores del lado derecho de la máquina a 3 alturas en la Finca Agro Erruz

En cuanto a los porcentajes de vegetación y huecos expuestos en el **gráfico 9**, observamos que Wide captó un 70,6% de vegetación, mientras que Narrow Beam captó un 70 % y Medium un 88,7%. Este no es el comportamiento esperado, y se hace muy difícil explicar el motivo por el que los sensores en configuración Wide y Narrow tienen un comportamiento similar en cuanto a la percepción de huecos. Sí que es verdad que la vegetación era muy homogénea, y estos resultados podrían mostrar una repetitividad de las medidas ya que se considera que el efecto del tamaño del haz va a tener poco impacto en este tipo de pared vegetal, pero al no poder explicar el valor de porcentaje de huecos en la configuración Medium hace que se deban proponer nuevos ensayos para corroborarlo.



**Gráfico 9:** Vegetación real finca Erruz, porcentaje de huecos y vegetación.

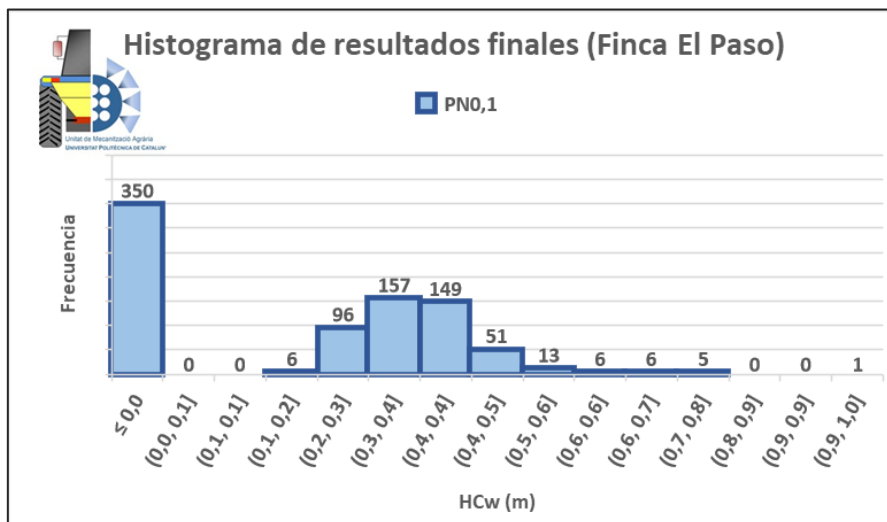
### 5.2.2 Finca El Paso

Los resultados en la finca El Paso muestran que la vegetación medida por los sensores se encuentra en el rango 0,33-0,41 m (**tabla 9**), esto queda un poco por debajo de lo que se midió manualmente (0,48 m). En este caso, al tratarse de un árbol con poca densidad, el mejor resultado se da con el sensor configurado con el haz Wide. Esto es normal dado que, al haber pocas hojas y una cantidad importante de huecos, la huella del cono del haz Wide es mucho mayor, con lo que tiene más probabilidad de encontrar una hoja

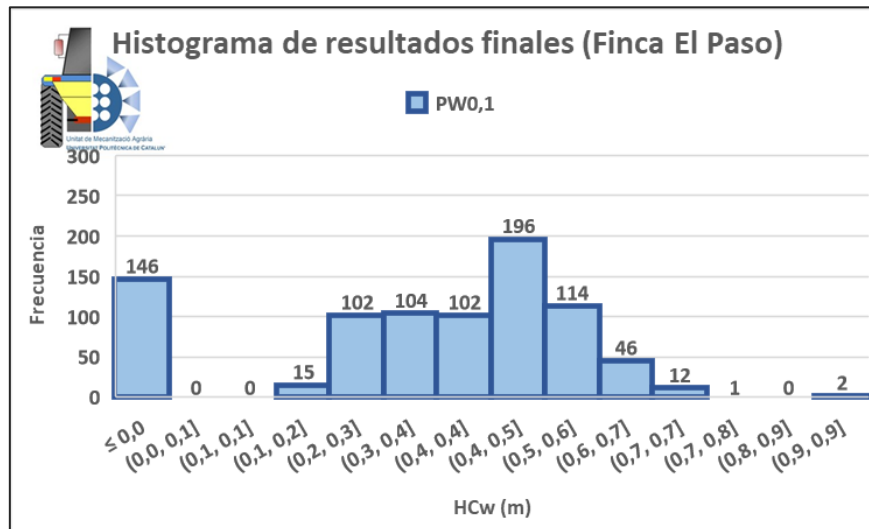
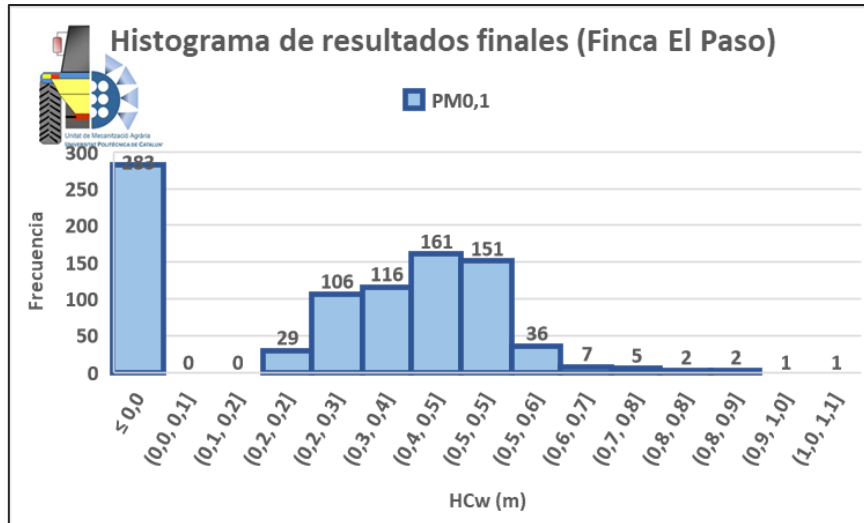
**Tabla 9:** Resumen y parámetros analizados de la Vegetación real con la configuración Medium, Narrow Beam y Wide - Finca El Paso.

Valores	Narrow	Medium	Wide
Max. HCw	0,64	0,67	0,68
Prom. HCw	0,33	0,37	0,41
N.º Huecos	58	59	24
% Huecos	41,5%	39,0%	17,4%
N.º Vegetación	82	91	116
% Vegetación	58,5%	61,0%	82,6%
Varianza	0,01	0,01	0,01
Desv. Estándar	0,08	0,08	0,08
Cv	22,9%	20,6%	19,2%
Variabilidad	V. Baja	V. Baja	V. Baja
Error Típico	0,07	0,07	0,08

Por otro lado, los histogramas de frecuencia muestran una distribución normal de los datos si eliminamos aquellos que dan como resultado 0 que son considerados como huecos en la vegetación. (**Gráfico 10**)



Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano

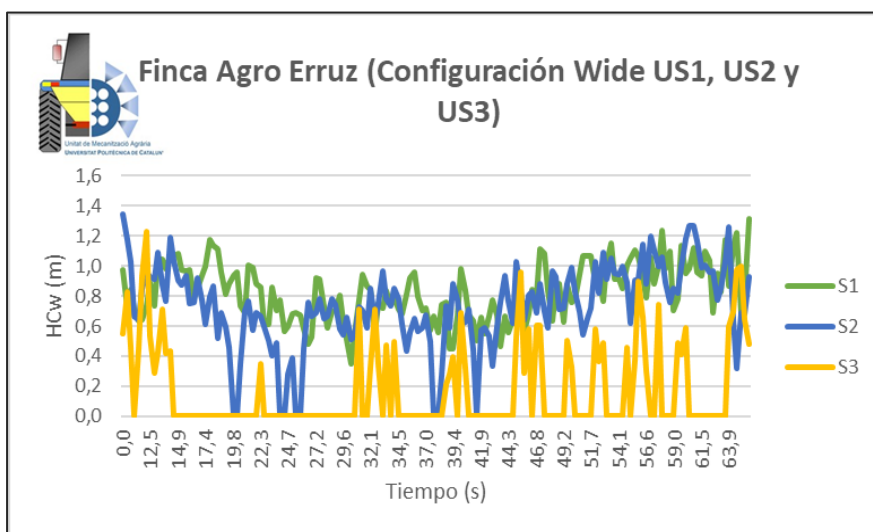
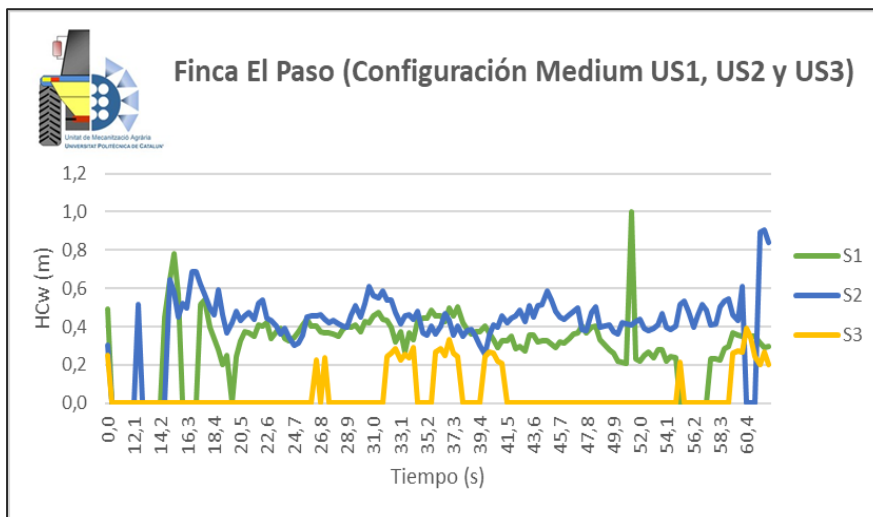
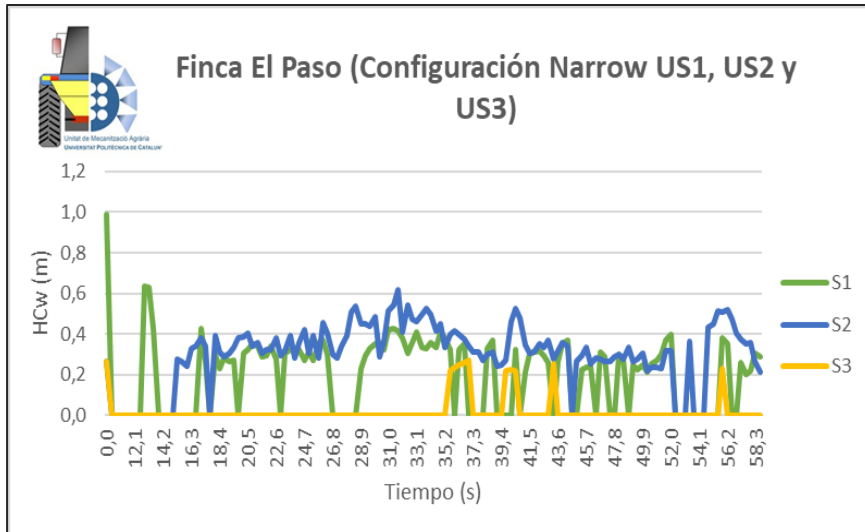


**Gráfico 10:** Histograma de Frecuencias de la vegetación real Finca El Paso con las tres configuraciones del sensor.

En el **gráfico 11 y 12** observamos los 6 sensores (3 por lado), donde se quiso determinar visualmente la homogeneidad de las lecturas, observamos en los gráficos que los sensores s3 y s6 configurado con Narrow casi no detentan vegetación (casi siempre da), esto se debe al ancho de cono y a la poca densidad del de la vegetación, también por que los sensores S3 Y S6 están ubicados en la parte superior por lo que lee solo la copa superior de la vegetación.

Por otro observamos que el número de huecos va disminuyendo a medida que aumentamos el tamaño del haz del sensor (Medium y Wide).

Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano



**Gráfico 11:** Respuesta de los sensores del lado izquierdo de la máquina a 3 alturas en la Finca El Paso

Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano

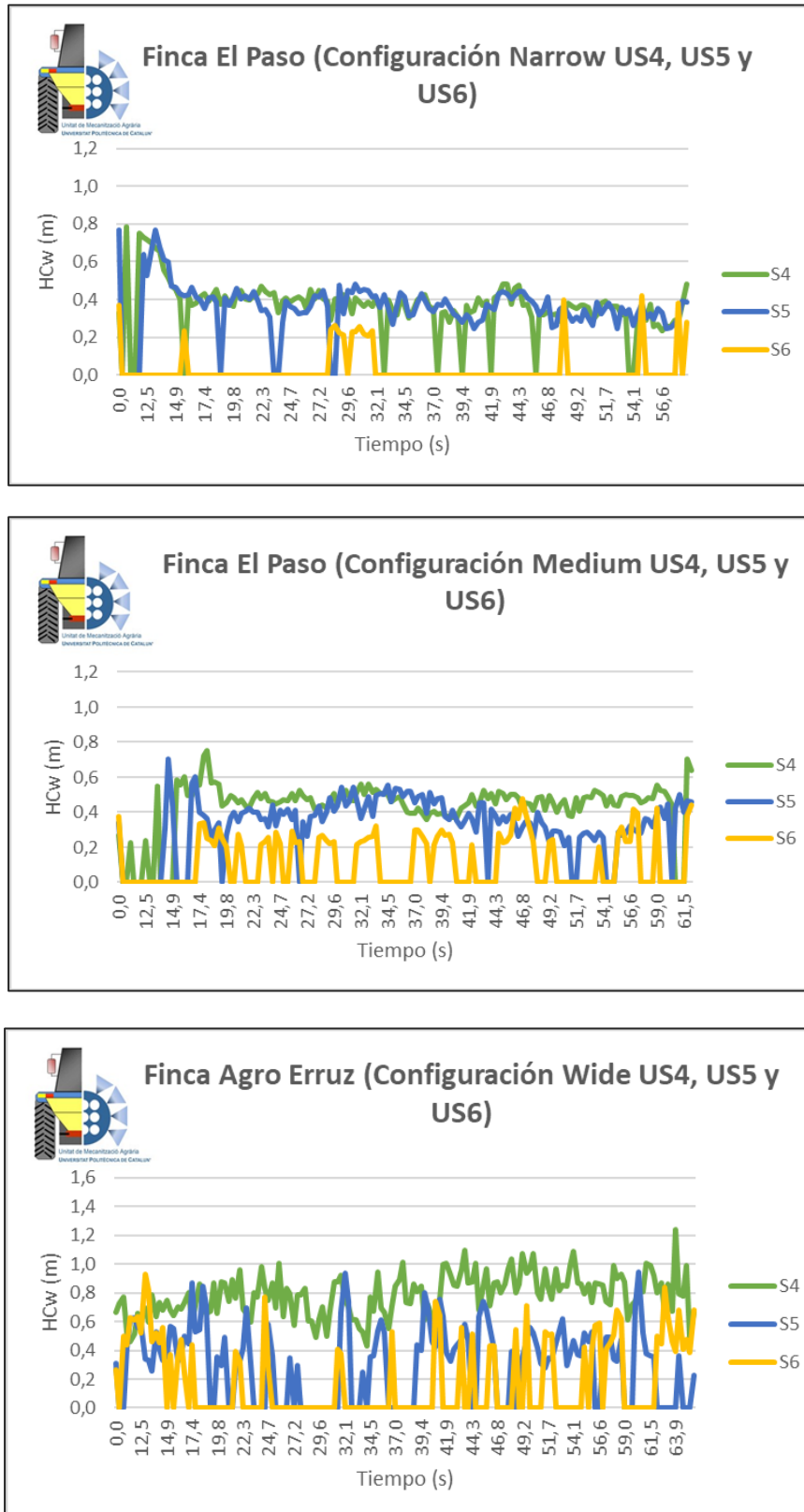
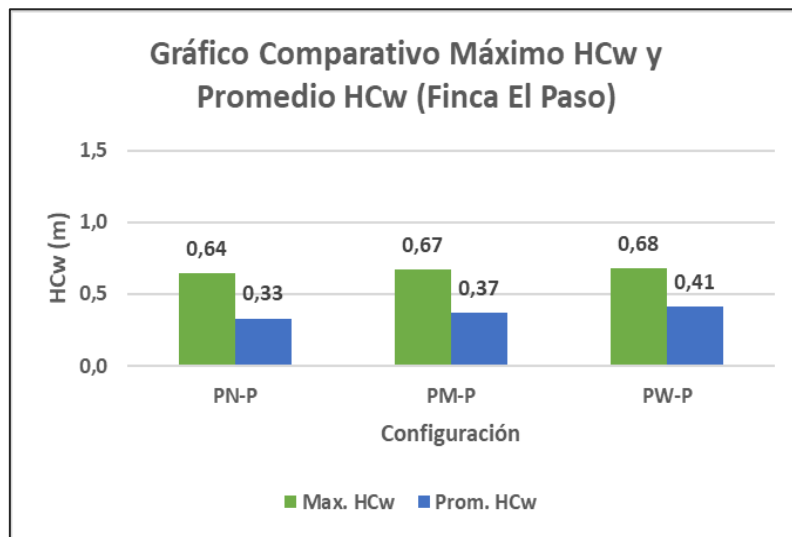


Gráfico 12: Respuesta de los sensores del lado derecho de la máquina a 3 alturas en la Finca El Paso

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

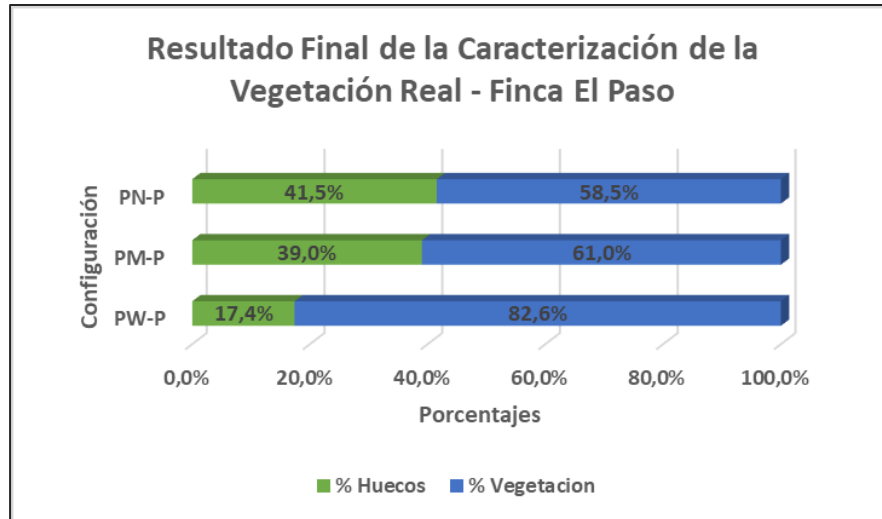
En el **gráfico 13** los valores máximos y mínimos de los ensayos con la configuración Wide nos muestra una anchura de vegetación de 0,41 cm obteniendo una similitud con el Cw de campo del 85,4 %, seguido de Medium que nos da una anchura de vegetación de 0,37 cm teniendo una similitud del 77,1% del Cw de campo, la configuración Narrow Beam (average 5.2), tiene un alcance medio de 0,33 cm, que comparándolo con el Cw medio nos da 68,8 % de similitud. Por ello podemos determinar que Wide y Medium tienen más impacto sobre las hojas al momento de caracterizar la vegetación, esto se debe por el ancho de cono utilizado. Pero a la vez podemos apreciar que el haz configurado con Narrow no tuvo tanto impacto debido a que el área de muestreo es muy limitada por su cono estrecho.



**Gráfico 13:** Análisis comparativo del HCw máximo y medio de la Finca El Paso

En el análisis final, tenemos como resultados en el **gráfico 14** los porcentajes de huecos y el porcentaje de vegetación, con estos datos damos a conocer que Wide pudo captar el 80,6% de vegetación, mientras que Narrow Beam; average 5-2, captó un 58,5 % y médium un 61,0%.

Por estas razones, podemos decir que Wide tiene más impacto sobre la vegetación debido a su ancho de cono que es capaz de poder captar más superficie foliar y tener más impacto sobre las hojas, reduciendo el número de huecos.

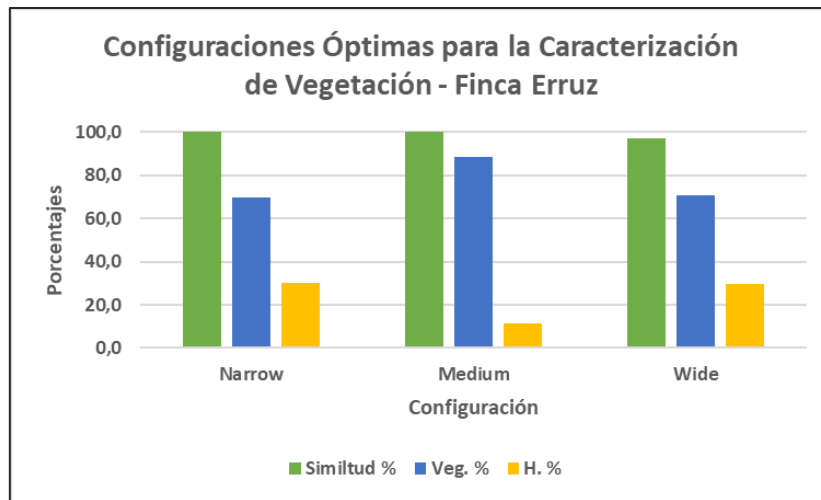


**Gráfico 14:** Vegetación real finca El Paso, porcentaje de huecos y vegetación.

### 5.2.3 Configuración óptima para la caracterización de Vegetación, finca Erruz y El Paso

Se han estudiado tres tipos de configuraciones para medir el ancho de vegetación en dos fincas comerciales. Se ha observado que, en el caso de disponer de una vegetación muy densa, con pocos huecos y bien estructurada, la influencia del tamaño del haz del sensor es menos importante que en plantaciones más variables y menos densas. En Erruz, donde el número de hojas era mucho más importante que en la finca El Paso, las configuraciones Narrow, Medium y Wide han aportado resultados muy similares. No ha pasado lo mismo en la finca El Paso, en el que el hecho de disponer de un haz del sensor con una huella lo suficientemente grande como para detectar en la mayoría de casos una rama o grupo de hojas para realizar la medición, ha hecho que la estimación de las dimensiones del árbol sea más acertada que la configuración Medium y mucho más que la configuración Narrow. Esta última configuración no parece ser muy adecuada cuando tenemos árboles poco densos, ya que la mayoría de lecturas se nos escapan entre las pocas hojas de la pared de vegetación.

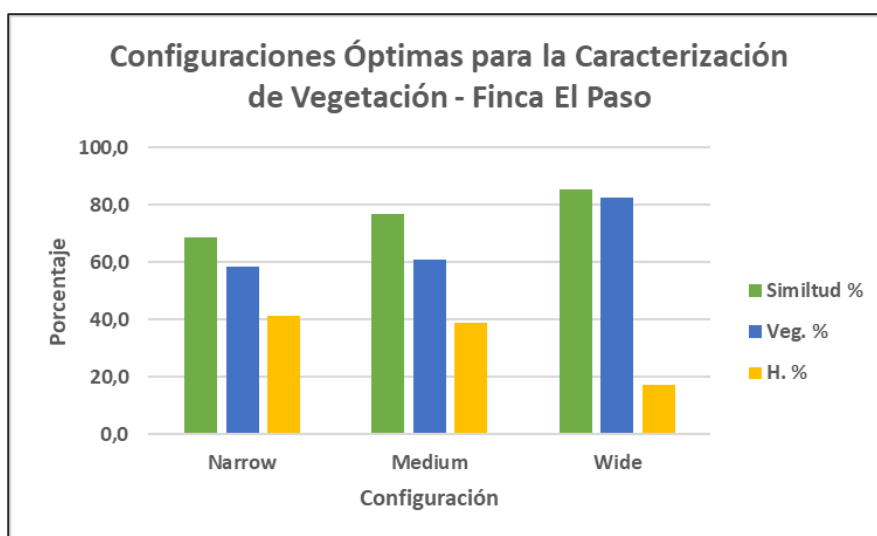
Si por el contrario queremos detectar los huecos en el árbol puede ser una buena estrategia trabajar con la configuración Narrow, ya que su penetrabilidad en la canopia es muy elevada. De hecho, esto se hace visible en el **gráfico 15** donde la cantidad de huecos crece a medida que disminuimos la huella del haz del sensor. Por el contrario, en los árboles de Erruz, son más densos, esta norma no se cumple.



**Gráfico 15:** análisis de comparación de las configuraciones para caracterizar vegetación – Finca Erruz

Cabe destacar que, aunque este proyecto ha podido determinar un protocolo de trabajo para estimar el porcentaje de huecos a partir de los datos de ultrasonidos, no ha desarrollado ninguna metodología de validación de estos resultados en campo. Evaluar la porosidad, o número de huecos en una pared vegetativa requiere de técnicas de análisis muy sofisticadas o costosas en tiempo y personal humano. Se propone que este proyecto sirva como punto de partida para otros proyectos de validación de los resultados referentes al % de huecos estimados a partir de los sensores de ultrasonidos.

En el **gráfico 16** observamos que la configuración Wide es capaz de caracterizar mejor la vegetación, captando mayor vegetación y menos vacíos (huecos).



**Gráfico 16:** Análisis Comparativo para la caracterización de la vegetación, Finca El Paso.



## **6. Conclusiones**

Se han estudiado distintas configuraciones de los sensores de ultrasonidos en diferentes escenarios de vegetación y se ha observado la influencia que tiene el tamaño del haz del sensor sobre las medidas de vegetación obtenidas. Por otro lado, se ha desarrollado una metodología para cuantificar los huecos en la vegetación a partir de los sensores de ultrasonidos, aunque debe validarse en campo en futuros proyectos.

Para vegetaciones muy densas, cualquiera de las configuraciones puede entregar una buena estimación del tamaño del árbol, pero cuando la vegetación dispone de pocas hojas, las configuraciones con haz del sensor más grande funcionan mejor ya que les cuesta más penetrar por los huecos que pueda haber. Así mismo si el objetivo es analizar los huecos en la vegetación, se requieren haces de sensor más próximos a la configuración Narrow, aunque una configuración Medium puede dar también buenos resultados en la estimación de huecos mientras mantenemos un buen nivel de estimación del ancho de la vegetación.

Para finalizar con lo expuesto, futuros desarrollos pasan por establecer diferencias de densidad de la vegetación con niveles decrecientes, pero con intervalos más pequeños que los estudiados en este proyecto, ya que se observa un estado de estabilización entre el % de huecos y la disminución de la densidad. Al decrecer la densidad aumentan rápidamente el % de huecos, hasta que llega un punto que por más que eliminemos hojas, el % de huecos no varía. Por este motivo, se proponen densidades del 100%, 90% y 80% para futuros estudios para poder evaluar esta transición.

## **7. Bibliografía**

- Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: European Green Deal COM/2019/640. Disponible online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/DOC/?uri=CELEX:52019DC0640&from=EN> (acceso: 15 abril de 2021).
- COM. (2020). Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions: A Farm to Fork Strategy for a fair, healthy and environmentally-friendly food System COM/2020/381. Disponible online: [https://ec.europa.eu/food/farm2fork\\_en](https://ec.europa.eu/food/farm2fork_en) (acceso: 15 de abril de 2021).
- Directiva (UE) 2009/128 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 21 de octubre de 2009 por la que se establece el marco de la actuación comunitaria para conseguir un uso sostenible de los plaguicidas. Diario Oficial de la Unión Europea L309, Bruselas, Bélgica, 25 de noviembre de 2009, pp. 71 – 86
- Reglamento (CE) nº 1107/2009 o zonas protegidas que define la Directiva 2000/60/CE u otras zonas señaladas a efectos de establecer las necesarias medidas de conservación de acuerdo con lo dispuesto en la Directiva 79/409/CEE y en la Directiva 92/43/CEE.
- Koch, H., 2007. How to achieve conformity with the dose expression and sprayer function in high crops. Bayer Crop Science Journal, 60, 71–84.
- Arnó, J. (2008). Una investigación sobre la variabilidad intraparcelsaria en viña y el uso de sensores láser en viticultura de precisión. [Tesis Doctoral]. Universitat de Lleida.
- ISPA. (2021). Precision Agriculture Definition. <https://www.ispag.org/about/definition>
- Campos, J. (2018). Tecnologías emergentes y agricultura de precisión en cultivos tridimensionales. Implementación y mejora de las técnicas de aplicación de fitosanitarios en viña. Tesis Doctoral / Universidad Politècnica de Catalunya Barcelona Tech, 134.
- Planas, S. (1990). Optimización de los tratamientos fitosanitarios en plantaciones frutales. Universidad Politècnica de Catalunya, 241.
- Gil, E., Escolà, A., Rosell, J. R., Planas, S. y Val, L. (2007). Variable rate application of plant protection products in vineyard using ultrasonic sensors. Crop Protection, 26(8), 1287–1297. doi: 10.1016/j.cropro.2006.11.003
- Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X., Escolà, A. y Rosell-Polo, J. R. (2013). Variable rate sprayer. Part 2 - Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. Computers and Electronics in Agriculture, 95, 136–150. doi: 10.1016/j.compag.2013.02.01

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En  
Plantaciones De Manzano*

- Llorens, J., Gil, E., Llop, J., y Escolà, A. (2011a). Ultrasonic and LIDAR sensors for electronic canopy characterization in vineyards: Advances to improve pesticide application methods. *Sensors*, 11(2), 2177–2194. doi:10.3390/s110202177
- Chakraborty, M., Khot, L. R., Sankaran, S., y Jacoby, P. W. (2019). Evaluation of mobile 3D light detection and ranging based canopy mapping system for tree fruit crops. *Computers and Electronics in Agriculture*, 158, 284–293. doi: 10.1016/j.compag.2019.02.012
- Cheraïet, A., Naud, O., Carra, M., Codis, S., Lebeau, F., y Taylor, J. (2020). An algorithm to automate the filtering and classifying of 2D LiDAR data for site-specific estimations of canopy height and width in vineyards. *Biosystems Engineering*, 200, 450–465. doi:10.1016/j.biosystemseng.2020.10.016
- Fillat, A., Pascual Di Prinzio, A., Escola Agusti, A., Bustos Maté, Á., Castillo Herrán, B., & Fernández, D. (2010). Tecnología de aplicación de agroquímicos. En CYTED Red «Pulso» (107RT0319).
- Grella, M.; Gallart, M.; Marucco, P.; Balsari, P.; Gil, E. Ground Deposition and Airborne Spray Drift Assessment in Vineyard and Orchard: The Influence of Environmental Variables and Sprayer Settings. *Sustainability* 2017, 9, 728. [CrossRef]
- Zaman, Q.U., Salyani M. Effects of foliage density and ground speed on ultrasonic measurements of citrus tree volume. *Applied Engineering in Agriculture*., 2004, 20 (2), 173-178.
- Balsari, P., Doruchowski, G., Marucco, P., Tamagnone, M., van de Zande, J.C., Wenneker, M. A., System for adjusting the spray application to the target characteristics. *Agr. Eng. Int. CIGR Ejournal* 2008, X, 1–11
- Doruchowski, G., Balsari, P., Van de Zande, J.C., Development of A Crop Adapted Spray Application System for Sustainable Plant Protection in Fruit Growing. *Proceedings of International Symposium on Application of Precision Agriculture for Fruits and Vegetables*, Orlando, FL, USA, 1 April 2009.
- Llorens, J., Gil, E., Llop, J., Escolà, A., Variable rate dosing in precision viticulture: Use of electronic devices to improve application efficiency. *Crop Prot.*, 2010, 29, 239–248
- Escolà, A., Method for Real-Time Variable Rate Application of Plant Protection Products in Precision Horticulture/Fructiculture. Ph.D. Thesis, Universitat de Lleida, Lleida, Spain, 2010
- Escolà, A., Rosell-Polo, J. R., Planas, S., Gil, E., Pomar, J., Camp, F., et al., Variable rate sprayer Part 1—Orchard prototype: design, implementation and validation. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, 95, 122–135.
- Gil, E., Llorens, J., Llop, J., Fàbregas, X., Escolà, A., Rosell-Polo, J.R., Variable rate sprayer. Part 2—Vineyard prototype: Design, implementation, and validation. *Comput. Electron. Agric.*, 2013, 95, 136–150

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En Plantaciones De Manzano*

- Escolà, A., Martínez-Casasnovas, J.A., Rufat, J., Arnó, J., Arbonés, A., Sebé, F., Pascual, M., Gregorio, E., and Rosell-Polo, J.R. (2017). Mobile terrestrial laser scanner applications in precision fruticulture/horticulture and tools to extract information from canopy point clouds. *Precision Agriculture*, 18(1), 111–132.
- Chen, Y., Zhu, H., & Ozkan, H. E. (2013). Real-time tree foliage density estimation with laser scanning sensor for variable-rate tree sprayer development. Paper no 131596009. St Joseph, MI, USA: ASABE.
- Baumer. (2021). Ur18.da0.2-iamj.9sf. 1-2.
- Campos, J. (2018). Tecnologías emergentes y agricultura de precisión en cultivos tridimensionales. Implementación y mejora de las técnicas de aplicación de fitosanitarios en viña. Tesis Doctoral / Universidad Politécnica de Catalunya Barcelona Tech, 134.
- COM. (2019). El Pacto Verde Europeo. Comunicación de la Comisión al Parlamento Europeo, al Consejo Europeo, al Consejo, al Comité Económico y Social Europeo y al Comité de las Regiones., Bruselas, 11.12.2019 COM(2019) 640 final COMUNICACIÓN, 28.
- Escolá, A., Martínez, J., Rufat, J., Arnó, J., & Arbonés, A. (2017). Mobile terrestrial laser scanner applications in Precision Fruticulture/Horticulture and tools to extract information from canopy point clouds. This is a post-peer-review, pre-copyedit version of the article published in the Springer journal *PRECISION AGRICULTURE* (2017) 18:111–132. The final authenticated version is available online at <https://doi.org/10.1007/s11119-016-9474-5>, 5-24.
- Fillat, A., Pascual Di Prinzio, A., Escola Agusti, A., Bustos Maté, Á., Castillo Herrán, B., & Fernández, D. (2010). Tecnología de aplicación de agroquímicos. En *CYTED Red «Pulso»* (107RT0319).
- Gil, E. (2009). *Días de campo*. 258.
- Grella, M., Gallart, M., Marucco, P., Balsari, P., & Gil, E. (2017). Ground deposition and airborne spray drift assessment in vineyard and orchard: The influence of environmental variables and sprayer settings. *Sustainability MDPI*, 9(5). <https://doi.org/10.3390/su9050728>
- Palacín, J., Pallejà, T., Tresanchez, M., Sanz, R., Llorens, J., Ribes-Dasi, M., Masip, J., Arnó, J., Escolà, A., & Rosell, J. R. (2007). Real-time tree-foliage surface estimation using a ground laser scanner. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 56(4), 1377-1383. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.900126>
- Palau, M. (2019). Desenvoluoament de la metodologia per alávaluació de distribució de fitosanitarios generada per un atomotzador utilitzant vegetació artificial. *Universidad Politecnica de Catalunya*, 51.
- Pallas, R. (1992). Ultrasonic based sensors. *Sensors (Petersborough, N.H.)*, 9(6), 16-21.

*Validación De Un Sensor De Ultrasonido Para La Caracterización De La Vegetación En  
Plantaciones De Manzano*

- Planas, S. (1990). Optimización de los tratamientos fitosanitarios en plantaciones frutales. Universidad Politécnica de Catalunya, 241.
- Toa, M., & Akeem, W. (2020). Ultrasonic sensing Basics. Texas Instruments, 3(4), 217. [https://doi.org/10.1016/0041-624X\(65\)90192-7](https://doi.org/10.1016/0041-624X(65)90192-7)Ultrasonic Sensor. (2019). Sensor UC4000-L2-U-V15. 1-4.
- Gil E., Llop J., Gallart M., Valera M., Llorens J., Llop J., Bayer T., Carvalho C. 2014. Spray adjustments based on LWA concept in vineyard. Relationship between canopy and coverage for different application setting. Aspects of Applied Biology 122, Internattional Advances in Pesticide Application.
- Gil E., Llop J., Gallart M., Valera M., Llorens J. 2015. Design and evaluation of a manual device for air flow rate adjustment in spray application in vineyards. Proceedings of the Suprofruit 2015-13 th Workshop on Spray Application in Fruit Growing
- Miranda-Fuentes A., Gamarra-Diezma J.L., Blanco-Roldán G. L., Cuenca A., Llorens. 2015. Testing the influence of the air flow rate on spray deposit, coverage and losses to the ground in a super-intensive olive orchard in southern Spain. Julius-Kühn-Archiv 448 (2015): 17.
- Palau, M. (2019). Desenvoluoament de la metodlogia per alávaluació de distribució de fitosanitariis generada per un atomotzador utilitzant vegetació artificial. Universidad Politécnica de Catalunya, 51.

## **Índice de Figuras**

<b>Figura 1:</b> Pacto Verde Europeo, iniciativas en los diferentes ámbitos de actuación.....	2
<b>Figura 2:</b> Detección Ultrasónica del Tipo de Superficie. Fuente: Fundamentos de la Detección por ultrasonido .....	8
<b>Figura 3:</b> Mediciones Ultrasónicas Emisor / Receptor .....	8
<b>Figura 4:</b> Configuraciones del Sensor. Fuente: (Baumer, 2021).....	9
<b>Figura 5:</b> Dimensiones y elementos de indicación de manejo. ....	10
<b>Figura 6:</b> Pulverizador Inverter Qi 9.0 (FEDE) con Tecnología H30, - Proyecto H2020. ....	11
<b>Figura 7:</b> Árboles artificiales. ....	13
<b>Figura 8:</b> Primer ensayo de Laboratorio con Vegetación Artificial.....	14
<b>Figura 9:</b> Ensayo con Vegetación Real (Epila, Zaragoza).....	15
<b>Figura 10:</b> Modelo de lectura del Sensor .....	17

## **Índice de Gráficos**

<b>Gráfico 1:</b> Recta de calibración.....	12
<b>Gráfico 2:</b> Histogramas de Frecuencias de la vegetación artificial en las tres configuraciones de densidad del árbol. ....	20
<b>Gráfico 3:</b> Respuesta de los sensores del lado derecho de la máquina a 3 alturas en la Vegetación Artificial .....	21
<b>Gráfico 4:</b> Análisis comparativo de los valores HCw máximos y medios de la vegetación artificial. ....	22
<b>Gráfico 5:</b> Vegetación artificial: porcentaje de huecos y vegetación.....	22
<b>Gráfico 6:</b> Histograma de Frecuencias de la vegetación real Finca Agro Erruz con las tres configuraciones del sensor. ....	24
<b>Gráfico 7:</b> Respuesta de los sensores del lado izquierdo de la máquina a 3 alturas en la Finca Agro Erruz.....	26
<b>Gráfico 8:</b> Respuesta de los sensores del lado derecho de la máquina a 3 alturas en la Finca Agro Erruz.....	27
<b>Gráfico 9:</b> Vegetación real finca Erruz, porcentaje de huecos y vegetación.....	27
<b>Gráfico 10:</b> Histograma de Frecuencias de la vegetación real Finca El Paso con las tres configuraciones del sensor. ....	29
<b>Gráfico 11:</b> Respuesta de los sensores del lado izquierdo de la máquina a 3 alturas en la Finca El Paso .....	30
<b>Gráfico 12:</b> Respuesta de los sensores del lado derecho de la máquina a 3 alturas en la Finca El Paso .....	31
<b>Gráfico 13:</b> Análisis comparativo del HCw máximo y medio de la Finca El Paso.....	32
<b>Gráfico 14:</b> Vegetación real finca El Paso, porcentaje de huecos y vegetación. ....	33
<b>Gráfico 15:</b> análisis de comparación de las configuraciones para caracterizar vegetación – Finca Erruz.....	34
<b>Gráfico 16:</b> Análisis Comparativo para la caracterización de le vegetación, Finca El Paso.....	34

## **Índice de Tablas**

<b>Tabla 1:</b> Parámetros de densidad de la Vegetación Artificial. ....	15
<b>Tabla 2:</b> Configuración para la Validación y caracterización .....	15
<b>Tabla 3:</b> Configuración para la validación y caracterización .....	16
<b>Tabla 4:</b> Medidas de la Vegetación en estado BBCH 72. F. del ensayo 10/05/2021 .....	16
Tabla 5: Parámetros de densidad de la Vegetación Natural .....	16
<b>Tabla 6:</b> Valores del Coeficiente de Variación .....	17
<b>Tabla 7:</b> Resumen y parámetros analizados de la Vegetación artificial (Densidad High, Medium, Low) con la configuración Narrow Beam .....	18
<b>Tabla 8:</b> Resumen y parámetros analizados de la Vegetación real con la configuración Medium, Narrow y Wide, Agro Erruz. ....	23
<b>Tabla 9:</b> Resumen y parámetros analizados de la Vegetación real con la configuración Medium, Narrow Beam Wide - Finca El Paso. ....	28



## **Índice de Ecuaciones**

<b>Ecuación 1:</b> Calcular LAI.....	13
<b>Ecuación 2:</b> Hallar la mitad de la anchura de la Vegetación.....	17
<b>Ecuación 3:</b> Coeficiente de Variación.....	17