



Universidad de Valladolid
Campus de Palencia

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIERÍAS AGRARIAS**

**Titulación
MASTER EN INGENIERÍA DE MONTES**

Título del Trabajo

**MEDICIONES DENDROMÉTRICAS Y
DASOMÉTRICAS MEDIANTE TÉCNICAS
LIDAR Y FOTOGRAMÉTRICAS**

Alumna: SARA UZQUIANO PÉREZ

**Tutor: FELIPE BRAVO OVIEDO
Cotutor: JOSÉ MARTÍNEZ RUBIO**

MEMORIA

RESUMEN

Las grandes posibilidades de bienes y servicios privados y públicos que ofrecen los bosques hace necesario obtener la mayor información posible sobre ellos, con gran fiabilidad en sus mediciones dendrométricas y dasométricas. La tecnología LiDAR terrestre (TLS) y la fotogrametría aérea a través de vehículos aéreos no tripulados (RPAS) son herramientas de trabajo capaces de proporcionar toda esa información a través de las reconstrucciones en 3D que generan.

El objeto de este trabajo ha sido realizar una comparación de mediciones entre estas nuevas tecnologías y los métodos tradicionales. En concreto, a través de hipsómetro, cinta métrica y forcípula midiendo distintas variables dendrométricas y dasométricas en una parcela experimental de *Pinus pinaster* Ait. en el municipio de Mata de Cuéllar (Segovia).

A través del LiDAR terrestre se han medido las variables: altura del árbol, diámetro normal, altura de copa, anchura de copa y área basimétrica y, se ha realizado un análisis de comparación a través del modelo de regresión lineal $y = a + bx + \xi$ Donde 'y' es el valor convencional, 'a' el término independiente, 'b' el término dependiente, 'x' el valor obtenido mediante LiDAR o fotogrametría según el caso y ξ el término de error aleatorio del modelo, buscando que, $a = 0$ y $b = 1$. Comprobando así que $y = x$, es decir que las medidas obtenidas con herramientas convencionales son las mismas que las medidas a través de LiDAR o fotogrametría según corresponda.

Los resultados muestran que existe una buena correlación entre las técnicas LiDAR y convencionales para las variables altura del árbol, altura de copa y área basimétrica. No así para la anchura de copa y diámetro normal. Para el primer caso el análisis estadístico muestra que a mayor anchura de copa, mayor diferencia de resultados entre las medidas convencionales y las del TLS. Debido a la parcialidad con la que se obtienen los datos en campo, se considera que el LiDAR terrestre es capaz de proporcionarnos las medidas con mayor fiabilidad.

Para la variable diámetro normal el análisis estadístico indica que no existe una correlación entre las medidas realizadas con una y otra técnica. Esto puede ser debido a diversos factores intrínsecos a la tecnología LiDAR, alcance del láser en el tronco, adaptación del corte a 1,3 m del eje del árbol, así como la exactitud de representación de la sección muy distinta a la circunferencia que de forma tradicional se asemeja al medirlo con forcípula.

Con la fotogrametría aérea se ha comparado la variable altura de árbol. Del mismo modo el análisis estadístico indica que no hay correlación entre las medidas convencionales y las fotogramétricas. Este hecho puede ser debido a errores realizados durante el vuelo como es la inclinación y la cantidad de repetibilidad de fotografías tomadas cruciales para la reconstrucción en 3D.

El uso de estas tecnologías es de reciente aplicación en el ámbito forestal, sobre todo en España por lo que es necesario seguir realizando estudios que puedan corroborar o desmentir los resultados obtenidos en este trabajo. Aún así, se ha podido demostrar la gran precisión de representación en 3D que generan estas tecnologías, así como su capacidad potencial de ser de gran utilidad en parcelas permanentes donde se suelen realizar mediciones de forma más o menos periódica, estas tecnologías pueden de este modo permitir desarrollar modelos de predicción de crecimiento de los bosques, entre otras cuestiones más.

INDICE

1. INTRODUCCIÓN.....	1
2. MATERIAL Y METODOS	4
2.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	4
2.2. DATOS DE CAMPO	6
2.2.1. Datos LiDAR terrestre.....	7
2.2.2. Datos de fotogrametría aérea	12
2.2.3. Fotogrametría Terrestre	15
2.2.4. Inventariación convencional.....	16
2.3. Trabajo de Gabinete.....	18
2.3.1. Datos LiDAR Terrestre.....	18
2.3.2. Datos Fotogramétricos aéreos y terrestres	22
2.3.3. Obtención de resultados	25
2.4. ANALISIS ESTADISTICO	35
3. RESULTADOS	36
3.1. RESULTADOS LiDAR.....	36
3.2. RESULTADOS FOTOGRAMETRICOS	40
3.2.1. Datos Fotogrametría aérea	40
3.2.2. Datos Fotogrametría terrestre	41
3.2. ANALISIS ESTADISTICO	42
4. DISCUSION.....	52
5. CONCLUSION.....	58
6. BIBLIOGRAFIA.....	59
ANEJOS	61
1. Informe GPS.	
2. Ficha técnica árbol 12, parcela 2.	
3. Programa y resultados estadísticos (SAS).	
4. Informe del vuelo RPAS.	

1. INTRODUCCIÓN

En la actualidad, se espera cada vez más que los bosques no sólo sean capaces de generar madera, si no también gran variedad de servicios públicos, industriales y privados (MOSKAL ET AL. 2009), para ello se necesitan de una información que garantice que las mediciones sean estadísticamente robustas, (datos que no se vean afectados por pequeñas variaciones respecto a las hipótesis de los modelos), que sean repetibles, imparciales y obtenidas de una manera rentable (BALTSAVIAS, 1998).

Debido a que los bosques abarcan extensas superficies, es de gran importancia encontrar herramientas que consigan una gran precisión en las medidas, que hagan posible la repetibilidad, el detalle y especialmente la explicitud en las características de inventariación de los bosques e información sobre su estructura (MOSKAL ET AL, 2009). El poder disponer de una técnica automatizada para realizar las medidas sobre estas grandes extensiones tiene el potencial de mejorar las técnicas manuales convencionales, sobre todo en términos de objetividad y repetibilidad de los resultados con el consiguiente ahorro de tiempo (HOLGATE, 1967; BELL Y DILWORTH, 1998). La posibilidad de realizar inventariaciones de forma extensa aumenta la precisión y fiabilidad de la clasificación realizada sobre los bosques (HOPKINSON Y CHASMER, 2009), por tanto se hace necesario que el ámbito forestal aproveche el avance de las tecnologías y herramientas que a su vez sean herramientas sostenibles que incorporen componentes biológicos, ecológicos, sociales y económicos. La teledetección es una tecnología de monitorización que encaja perfectamente en la necesidad de precisión forestal recién descrita ya que desde sus inicios ha sido utilizada como una tecnología emergente capaz de monitorizar espacialmente y sistemáticamente cambios en el paisaje (MOSKAL ET AL, 2009).

El monitoreo de los ecosistemas forestales es una actividad crítica para la eficiencia del manejo de los recursos (E.G. HUNTER, 1999; FERGUSON AND ARCHIBALD, 2002; GARCIA-GONZALO ET AL., 2007). El desarrollo de modelos estructurales supone un reto para mejorar las habilidades en estimar atributos forestales con métodos de monitoreo a escala local. Existen numerosas aproximaciones de reconstrucción de dosel arbóreo pero la selección de uno de ellos depende de los requerimientos que busquemos en exactitud y detalle (DISNEY ET AL., 2006). Sin embargo, representar la arquitectura de un árbol es un reto debido al que el modelo debe ser capaz de identificar con las irregularidades que el mismo presenta (RUNIONS ET AL., 2007)

En el presente trabajo se realizará un análisis comparativo de medidas de altura, diámetro normal, medida de copa y área basimétrica realizadas de forma convencional en unas parcelas de muestreo de *Pinus pinaster* frente a las tecnologías LiDAR terrestre y fotogrametría.

Hoy en día el LiDAR aéreo (ALS, acrónimo de *Aerial Laser Scanning*) es cada vez más utilizado como un medio para la realización de mediciones estructurales de los bosques en áreas grandes. En particular, hay muchos estudios que demuestran las buenas relaciones entre los parámetros derivados de medidas y datos LIDAR aerotransportado forestales tales como la altura del dosel, área basal y el índice de área foliar (por ejemplo HYYPPÄ ET AL., 2008; NAESSET, 2004; ANDERSEN ET AL., 2006; KOCH ET AL., 2009). Sin embargo la información obtenida es limitada a una vista prácticamente vertical del bosque. Este punto de vista hace que sea difícil obtener mediciones directas de muchos aspectos clave de la estructura del bosque, sus mediciones se deben calibrar cuidadosamente contra las mediciones basadas en tierra (HOLMGREN ET AL, 2004; LIM ET AL, 2003).

El diámetro a la altura del pecho o diámetro normal, es una de las variables más importantes a medir en un árbol y sirve como base y parámetro común para el área basimétrica y la estimación volumétrica del árbol (MOSKAL ET AL, 2009). Conociendo la distribución de los diámetros normales podemos tener valiosa información sobre la estructura de la masa, el estado de desarrollo de la misma y en algunos casos también el método selvícola empleado (MOSKAL ET AL, 2009).

Por tanto, el uso de tecnología LiDAR en el ámbito forestal para estimar los diferentes atributos de los bosques a avanzado muy rápidamente en los últimos años, y en especial el uso de LiDAR terrestre, conocido también por las siglas TLS (acrónimo de *Terrestrial Laser Scanning*) (MEANS ET AL. 2000, NÆSSET ET AL. 2004, GOBAKKEN AND NÆSSET 2004, FALKOWSKI ET AL. 2006, LIM ET AL. 2008). Hoy en día, las investigaciones sobre tecnología LiDAR son importantes no sólo para estimación directa sobre atributos seleccionados de los bosques, sino también para determinar la fuerza de correlación entre métrica LiDAR y variables forestales (GOERNDT ET AL, 2009). Los datos que el LiDAR terrestre nos proporciona pueden permitir la caracterización en el desarrollo de la estructura del tronco, que combinados con otros métodos puede ser aplicado para investigar y evaluar la calidad de los árboles en pie así como la biomasa y la caracterización de la masa (BRIGGS ET AL, 2008).

El láser escáner o LiDAR terrestre se basa en el mismo principio que el LiDAR aerotransportado. Esto es, el barrido de la zona a levantar es realizado mediante un láser, sólo que en este caso se realiza desde un equipo estacionado sobre la superficie terrestre. De ahí que esta técnica también se conozca como "*Ground Based Lidar Technology*". Este dispositivo está provisto de un láser que mide ángulos, distancias e intensidad de los puntos iluminados, de manera sistemática, a una tasa elevada y en tiempos reales. El resultado es una nube de puntos 3D que representa el modelo escaneado (ARCO, 2010). Utilizan medidas taquimétricas, que consisten en la combinación de la medida de distancias y ángulos. El escáner barre todo su campo visual (*Field of View*; FoV) variando la dirección del rayo láser para poder escanear los diferentes puntos objeto de medida, bien rotando el propio dispositivo o bien utilizando un sistema de espejos rotativos. Este último método ha sido el utilizado en el presente estudio y es también el más utilizado, puesto que los espejos son más ligeros y pueden girar más rápidamente. La técnica se caracteriza por una alta repetibilidad de la medida con precisión y exactitud centimétrica, y hace posible la exploración de toda una superficie escaneada así como la detección de rasgos de tamaño pequeño. Lo único que se precisa es el propio escáner y un instrumento de referencia que permita obtener coordenadas absolutas, generalmente un GPS (aunque se puede prescindir de éste y trabajar en coordenadas locales) (JIMENEZ-PERALVAREZ, 2011). Para el presente trabajo se ha trabajado con coordenadas absolutas.

Mediante el TLS la captura se realiza sobre el terreno y se obtiene un modelo digital de superficies (MDS) de una forma relativamente directa, sencilla y rápida.

Cada una de Las nubes de puntos obtenidas de los diferentes puntos de escaneo, está contenida en el sistema de coordenadas propio de cada posición, una vez en gabinete es cuando se realiza la fusión de todas ellas BERNARDINI Y RUSHMEIER, 2002). Donde cada punto queda determinado por su posición (X, Y, Z) (JIMENEZ-PERALVAREZ, 2011).. El proceso completo, desde la adquisición de datos hasta la obtención de la información gráfica es lo que se conoce como "*pipeline 3D*" (BERNARDINI Y RUSHMEIER, 2002).

Los TLS son aparatos de elevada precisión, capaces de trabajar en diferentes entornos y bajo condiciones atmosféricas adversas (JIMENEZ-PERALVAREZ, 2011). Pero a pesar de las grandes posibilidades que se pueden aplicar a esta tecnología, el uso en el ámbito forestal para el análisis de alturas y diámetros normales está relativamente poco estudiado (MOSKAL ET AL, 2009).

La otra tecnología analizada en este trabajo es la fotogrametría. Los primeros intentos de introducir fotografías aéreas como instrumento de teledetección en el sector forestal se realizaron en 1887 con el objetivo de elaborar mapas de los montes a partir de fotografías aéreas y, de esta manera poder clasificar y describir el bosque a partir de las mismas. Hoy en día esta tecnología se utiliza ampliamente para facilitar la orientación en el monte así como la clasificación de las especies vegetales que en él habitan (VAN LAAR Y AKÇA, 2007).

La fotogrametría es una técnica que permite crear modelos en 3D a partir de imágenes 2D, y de esta manera obtener características geométricas de los objetos que representan mediante el uso de relaciones matemáticas establecidas en la geometría proyectiva, y en base a principios similares a los de la visión estereoscópica natural. Ya que las imágenes de los objetos son obtenidas por medios fotográficos, la medición se realiza a distancia, sin que exista contacto físico con el objeto. (JAUREGUI, 2006). Se trata de técnicas que hoy se utilizan de forma generalizada en la clasificación de los bosques, sin embargo, el desarrollo para su aplicación en técnicas de muestreo para inventario forestal ha sido menos espectacular, con excepción de Norte América, Escandinavia y los bosques tropicales donde se valen de las fotografías aéreas para realizar inventariación de los extensos bosques que existen en esas zonas (VAN LAAR Y AKÇA, 2007).

De forma general se acepta que la extracción de datos para la medición de los árboles a partir de fotografías aéreas en los bosques cerrados del centro de Europa tiene ciertas limitaciones. Sin embargo, recientes estudios alemanes, concluyen que las mediciones de fotos con la ayuda de la moderna tecnología digital ofrecen información dendrométrica de casi la misma precisión que la que se obtienen mediante levantamientos de tierra de forma convencional. En los bosques donde hay una gran intensidad de corta, la fotografía aérea, en combinación con la topografía es útil para estimar el índice de sitio, la densidad de la masa y el volumen de soporte de los rodales individuales. Además se puede extraer información que no es fácil de extraer desde el suelo, o que lo es pero a un costo mayor (VAN LAAR Y AKÇA, 2007).

Otros estudios indican que los métodos fotogramétricos son susceptibles de ser utilizados para estudiar la heredabilidad de la rectitud en especies con tendencia a curvarse como la analizada es este trabajo, *Pinus pinaster* (SIERRA DE GRADO, 1994) ya que este método permite realizar monitoreos de forma rápida y relativamente sencillos, lo cual podría ayudar a identificar las causas que con más frecuencia originan desviaciones en el tronco y definir así caracteres predictores de la rectitud en etapas juveniles (SHELBOURNE Y NAMKOONG, 1966)

En la práctica el objetivo de estudiar la aplicación de nuevas tecnologías en el ámbito forestal es por lo general poder realizar un gran número de medidas en diferentes lugares (para tener en cuenta la varianza espacial) y minimizar el coste (BALTSAVIAS, 1998). Por tanto, el objetivo de este trabajo es lograr unos primeros resultados en una pequeña escala que sean igual de fiables a los obtenidos en campo mediante técnicas convencionales que nos ayuden a mejorar la técnica de utilización de estas nuevas tecnologías en el ámbito forestal.

2. MATERIAL Y METODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDIO

El lugar objeto de estudio se encuentra en España, en la Comunidad de Castilla y León, dentro del monte público nº32 “*Común de la Torre y Jaramiela*”, perteneciente a la comunidad de Villa y Tierra Antigua de Cuéllar y situado en los términos municipales de Mata de Cuéllar y Vallelado (Segovia). Se trata de un lugar experimental de muestreo instalado por la Universidad de Valladolid en el año 2004 con la autorización y colaboración tanto de la propiedad (Comunidad de Villa y Tierra Antigua y Cuéllar) como del Servicio Territorial de Medio Ambiente de Segovia (Junta de Castilla y León).



Imagen 1. Mapa de situación de España en el que se resalta la comunidad de Castilla y León donde se encuentra Segovia, provincia en la que se emplaza el área de estudio. Fuente <http://navalmanzano.com/>



Imagen 2. Mapa de la Provincia de Segovia donde se muestran los principales municipios. El punto rojo marca la situación geográfica de la localidad de Mata de Cuéllar. Fuente <http://navalmanzano.com/>

La especie dominante del lugar es *Pinus pinaster* Ait. acompañado por una comunidad florística de especies anuales, típica mediterránea: *Micropyrum tenellum* (L.) link, *Sedum amplexicaule* DC., *Vulpia myuros* (L.) C.C. Gmelin, *Lupinus angustifolius* L.; vivaces y arbustivas: *Lavandula pedunculata* Miller, *Helichrysum italicum* (Roth) G. con individuos aislados de *Pinus pinea* L.

El sitio experimental (41° 22'N, 4° 29' W) se encuentra situado a 757 metros de altitud en un rodal llano. Según el Catálogo de Información Geocientífica del IGME, los suelos de esa zona son de origen cuaternario de la época del Holoceno. Se trata de suelos arenoso-limosos con gravas de cuarzo y cuarcita con presencia de abanicos aluviales.

El clima de la localidad es templado y cálido, con inviernos mucho más lluviosos que en verano. De acuerdo con Köppen y Geiger el clima del lugar se clasifica como Csb, es decir Oceánico-mediterráneo (verano suave). La temperatura media anual en Mata de Cuéllar es de 12,3 °C. Respecto a la precipitación, la media se encuentra alrededor de 412 mm (es.climate-data.org).



Gráfico 1. Climograma de la localidad de Mata de Cuéllar. Fuente: es.climate-data.org

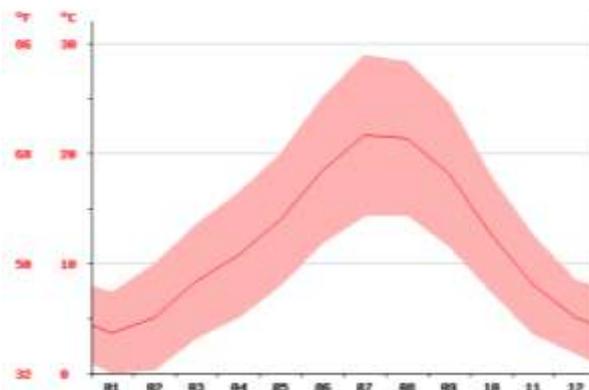


Gráfico 2. Diagrama de Temperaturas de la localidad de Mata de Cuéllar. Fuente es.climate-data.org

2.2. DATOS DE CAMPO

Dado que este estudio se ha realizado en un lugar donde paralelamente se están llevando a cabo otros estudios de regeneración natural y dispersión de semilla, el diseño experimental adoptado ha sido el ya utilizado para dichos estudios, un diseño *Split-Plot*, en el que un bloque experimental se divide, para este caso concreto, en diez parcelas de 0,49 ha de superficie (70X70 m). (Ver Imagen 3). Cada parcela presenta diferentes intensidades expresadas en relación al área basimétrica, así las parcelas 2, 4, 5 tienen una intensidad de corta del 25%; la 6, 7, 8 del 50% y la 10 se ha dejado como parcela de control, por lo tanto no se ha realizado ninguna intensidad corta sobre ella.. En el presente estudio se excluyen las parcelas 1,3 y 9 puesto que la intensidad de corta aplicada sobre ellas ha sido del 100% (GORDO ET AL., 2012, CAPÍTULO 5) Los árboles que pertenecen a cada una de las parcelas están marcadas con un número cardinal para facilitar su identificación.

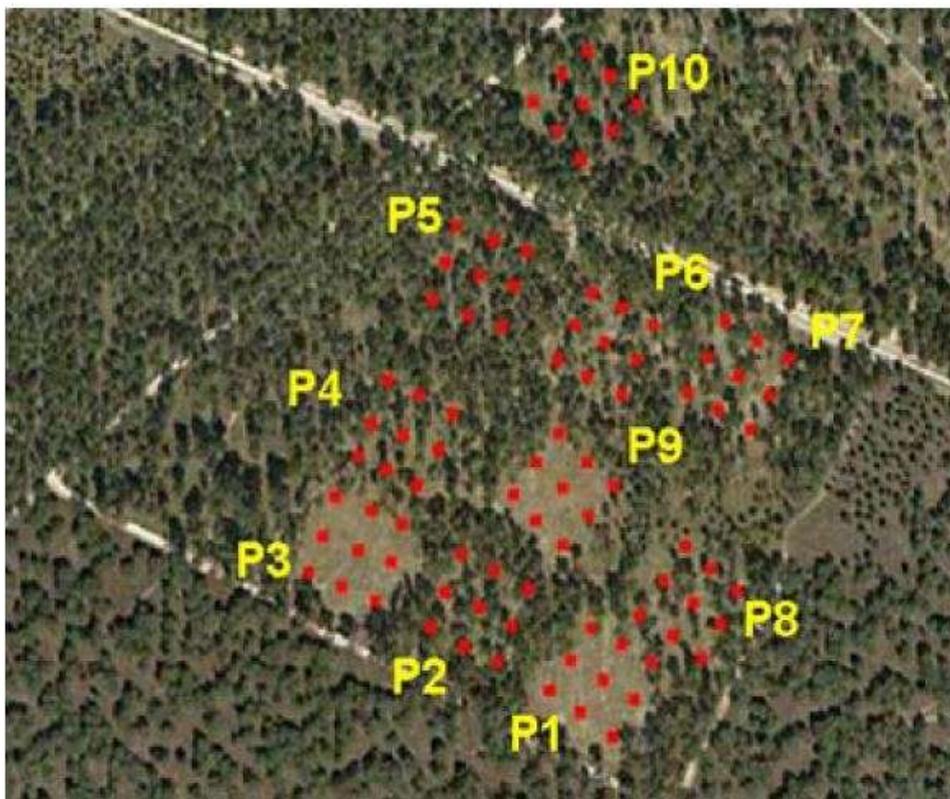


Imagen 3. Sitio experimental en el monte nº32 de mata de Cuéllar (Segovia). Los puntos rojos muestran la manera en la que se encuentran distribuidas las diez parcelas. (Fuente: imagen preparada por Ana Isabel de Lucas y obtenida de <http://sostenible.palencia.uva.es/compartida/CuellarExperimentalSite.pdf>).

En el presente estudio se han realizado mediciones de las variables dendrométricas: altura de árbol y diámetro normal, de cada uno de los árboles de las parcelas seleccionadas para la realización del trabajo. Como variable dasométrica se ha estudiado el área basimétrica.

La medición de copas no se ha realizado sobre la totalidad de los árboles como en el caso de las anteriores variables, si no que se han seleccionado 54 árboles. Dicha selección se ha realizado a partir de las nubes de puntos obtenidas por el LiDAR terrestre una vez se hubo caracterizado cada uno de los árboles en gabinete.

2.2.1. Datos LiDAR terrestre

Los datos LiDAR fueron capturados mediante el escáner terrestre Faro Focus 3D. Este aparato permite elegir la resolución y la calidad con que queremos realizar los escaneos. La resolución se expresa como una fracción de la máxima posible, es decir, el escáner puede medir alrededor de sí a lo largo de un número máximo de direcciones que va determinado por la resolución de los codificadores que miden los ángulos de rotación del espejo y del cabezal completo. Así, la resolución elegida para escanear las parcelas en este estudio ha sido de 1/5 lo que equivale a medir en la quinta parte de las 32 orientaciones posibles del láser en exterior. La calidad corresponde a la duración de cada medida individual, la cual redonda en un promedio más ajustado siendo 6x el modo de medición más lento a la vez que el más preciso, y 1x el más rápido y grosero. Para este estudio se ha elegido una calidad media 3x.

La duración aproximada en cada toma de escaneo realizado ha sido de 3 minutos, con un tamaño de 8192 x 3414 Puntos de escaneo (Pts.), esto supone un total aproximado de 28,0 millones de puntos por toma (MPts.) y una resolución espacial de 7,670 mm a 10m.

Los escaneos son panorámicos esféricos que abarcan desde 0° a 360° en el ángulo horizontal y desde -60° a 90° en el ángulo vertical. En cada parcela se ha realizado un total de 25 escaneos lo que ha supuesto una media de dos horas por parcela.



Imagen 4. Escáner Terrestre modelo *Faro Focus 3D*.

Para poder relacionar correctamente los datos obtenidos desde las sucesivas posiciones de escaneo, fue necesario colocar previamente esferas blancas como puntos de referencia o enlace que posteriormente, ayudarían a la unión de los escaneos en el trabajo de gabinete. Se han utilizado 10 esferas de diámetro 15 cm, material accesorio propio del escáner Faro Focus 3D y 15 esferas blancas de plástico de 18 cm de diámetro de fabricación propia para asegurar que se escanearan en todo momento más de tres esferas para poder hacer posible, así, la unión de las nubes de puntos individuales.

El posicionamiento de las marcas se hizo sobre estacas de madera de un metro de altura para asegurar de esta manera la visualización de las esferas en todo momento. (Ver Imagen 5.).



Imagen 5. Esferas blancas usadas para poder realizar la unión de los escaneos en gabinete. **Fotografía dcha.** Esferas originales del fabricante del escáner. **Fotografía izq.** Esferas blancas de elaboración propia.

En cada escaneo se crea una carpeta con múltiples archivos que contienen los datos de la medición (únicamente legibles por el software propio del escáner) y una imagen *preview* de 360° con extensión .jpg. (Ver Imagen 6.). Todos estos archivos se han ido guardando en una tarjeta SD que posteriormente se volcó a un ordenador para poder procesar los datos.



Imagen 6. Al terminar cada escaneo se crea una imagen *preview* de 360° con extensión .jpg.



Imagen 7. Ejemplo de colocación de los barridos y los puntos de enlace llevado a cabo en cada parcela. Los puntos blancos representan las esferas y los cuadrados azules las posiciones de escaneo.

En cada parcela se midieron las coordenadas de cuatro esferas blancas con ayuda de una Estación Total (modelo *Topcon 220*) para ubicar su posición en coordenadas locales, las cuales posteriormente se relacionarían con un marco de coordenadas geográficas utilizando un receptor GPS submétrico que permite trasladar el sistema local.



Imagen 8. Estación total modelo Topcon 220.

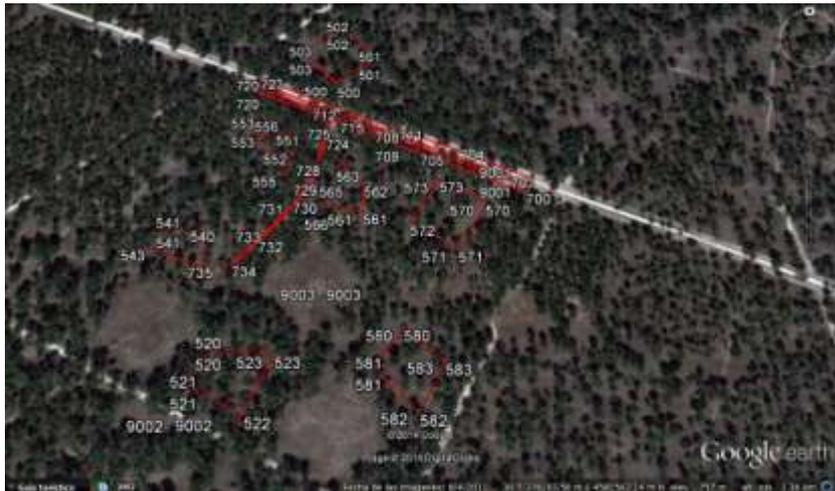


Imagen 9. Puntos de georreferenciación de las parcelas.

El GPS submétrico utilizado fue un equipo Leica modelo *SR20* de recepción monofrecuencia con antena externa *AT501*. Las mediciones fueron tomadas con una precisión de la línea de base en fase diferencial estática de $10 \text{ mm} + 2\text{ppm}$. Se tomaron tres puntos elegidos al azar, dos en el camino que separa la parcela 10 de las demás entre las parcelas 6 y 7 y el tercero en la esquina exterior izquierda de la parcela 2 (ver Imagen 10). El resumen del proceso se puede ver en el Anejo 1.



Imagen 10. Área de estudio. Los puntos marcados representan los lugares desde donde se obtuvieron las coordenadas submétricas.



Imagen 11. GPS Leica modelo SR20 utilizado para conseguir las coordenadas submétricas del lugar de estudio.

2.2.2. Datos de fotogrametría aérea

Para la obtención de estos datos se utilizó un vehículo aéreo no tripulado (UAV, *Unmanned Aerial Vehicle*), aunque hoy en día se prefiere el término en inglés RPAS (*Remotely Piloted Aircraft System*), siglas con las que se hará referencia al mismo de aquí en adelante.

El modelo utilizado ha sido un *Cuadróptero Microdrones MD-1000* perteneciente a la Universidad de Valladolid y gestionado por el Laboratorio de Fotogrametría Arquitectónica de la Universidad de Valladolid, al que se le incorporó una cámara *Olympus E-PM1*. El control del RPAS durante el vuelo se ha realizado desde la llamada estación de tierra (Imagen 12). Ésta se compone de un ordenador y un conjunto de sistemas de comunicaciones así como un telemando de radiocontrol estándar de aeromodelismo. En el ordenador, gracias a un programa informático denominado *MDCockpit*, fue posible seguir en tiempo real lo que la cámara captaba así como los instrumentos de una cabina virtual en los que se mostraba el estado de la batería, su nivel de autonomía, el estado de la señal GPS, velocidad de avance, altura de vuelo, etc. (Ver Imagen 13).



Imagen 12. Despegue del RPAS Cuadróptero Microdrones MD-1000 controlado en todo momento desde la estación de tierra.



Imagen 13. Detalle del programa MDCockpit que permite tener controlado el RPAS en todo momento.

El vuelo se ha realizado de forma automática siguiendo un recorrido diseñado previamente en el programa *MDCockpit* (ver Imagen 14). En la planificación se establecieron los puntos de paso del RPAS (*waypoints*), así como las instrucciones de orientación y disparo para la cámara en cada posición. De esta manera se ha podido optimizar el tiempo de vuelo, ya que uno de los principales problemas de este tipo de vehículos es la duración de la batería. Este modelo en concreto tiene una autonomía de 35 minutos.

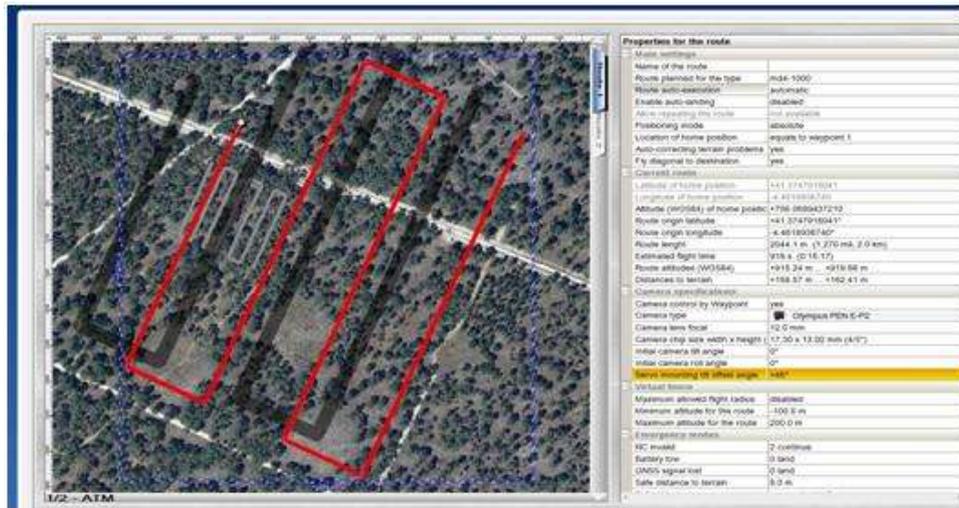


Imagen 14. Captura de imagen del diseño en campo del vuelo a realizar por el RPAS a través del programa *MDCockpit*. El recorrido marcado en gris pertenece al primer vuelo, y el recorrido marcado en rojo al segundo vuelo.

El programa además admite exportar el recorrido previo a *Google Earth*, donde se puede visualizar el terreno y la trayectoria del recorrido del RPAS de forma tridimensional, lo cual nos permite observar si existe algún obstáculo que desde el nivel del suelo no se aprecie y que pudiese obstaculizar el vuelo programado (Imagen 15.).

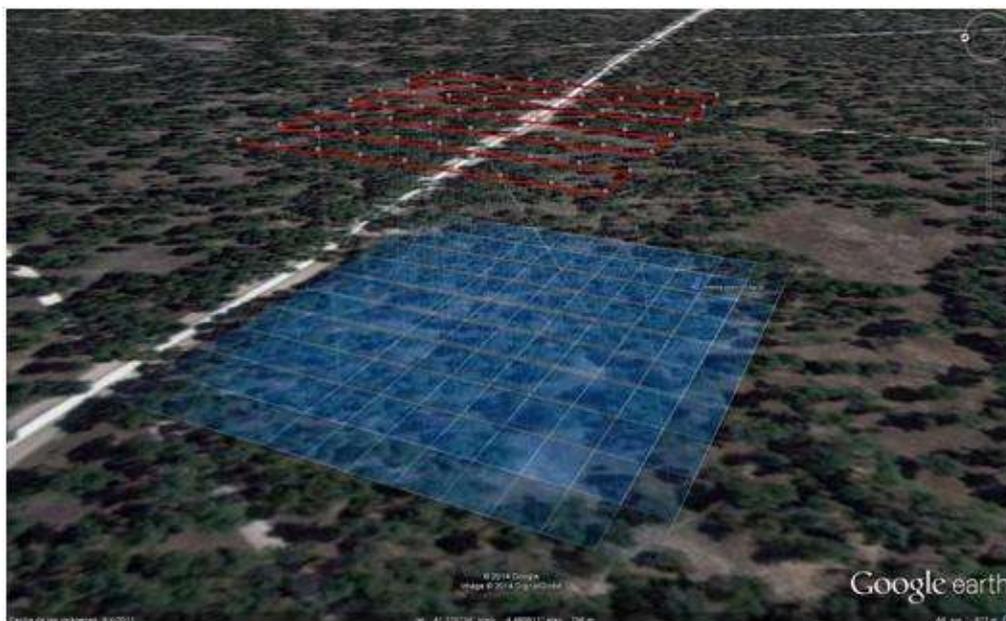


Imagen 15. Captura de imagen de la superposición del recorrido programado importado desde *MDCockpit* al programa *Google Earth*.

Las fotografías se tomaron de forma vertical y en formato crudo (.ORF) para poder corregir la exposición o el balance tonal durante el revelado digital en gabinete. Se realizó un primer vuelo a 60 metros de altura sobre la parcela 5 tomando un total de 63 fotografías y un segundo vuelo a 160 metros sobre la totalidad de las siete parcelas que conforman el presente estudio. En este segundo vuelo se tomaron un total de 77 fotografías. La Imagen 16 muestra un ejemplo de la calidad de las fotografías tomadas a ambas alturas.



Imagen 16. Imágenes captadas por el RPAS, Microdrones MD-1000. A la izquierda a 60 m de altura y a la derecha a 160 m de altura.

2.2.3. Fotogrametría Terrestre

De forma adicional también se ha querido hacer un ejercicio de fotogrametría terrestre tomando fotos de un tronco desde todos los ángulos del mismo. Para hacer posible la representación en 3D se han tomado un total de 19 fotos utilizando una cámara réflex *Olympus E-3* y una forcípula como medida de referencia para poder escalar el modelo resultante del cálculo fotogramétrico posteriormente en gabinete (Imagen 17).

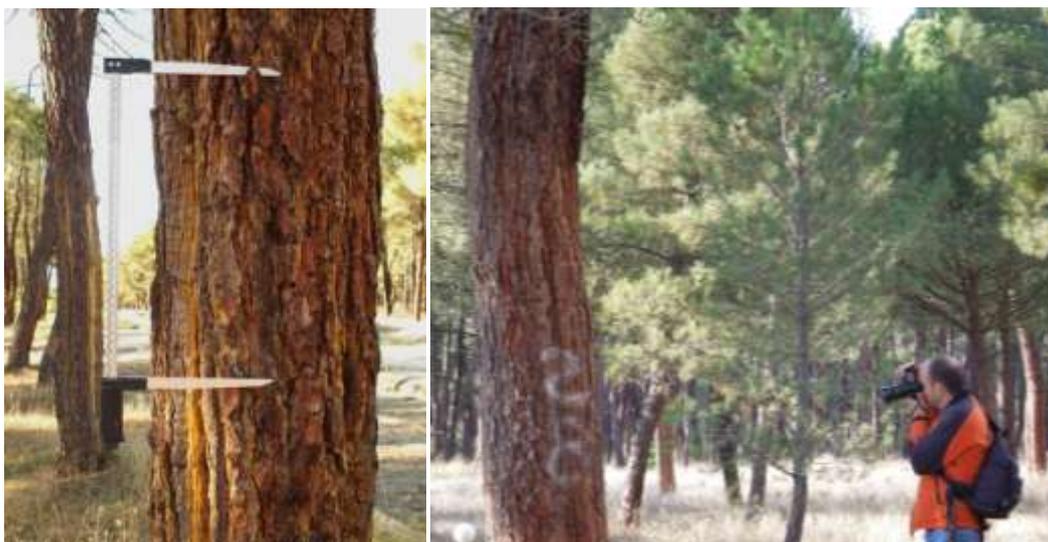


Imagen 17. Fotografía dcha. Uso de la forcípula como medida de referencia. **Fotografía izq.** Toma de fotos desde todos los ángulos del tronco.

2.2.4. Inventariación convencional

Para poder comparar los resultados obtenidos con el LiDAR Terrestre y la fotogrametría, se ha realizado una inventariación de las parcelas de la manera convencional, tomando los diámetros normales con ayuda de una forcípula, de precisión de décima de centímetro. La altura total, así como la altura de copa se ha medido con un hipsómetro marca *Haglöf Sweden* modelo *Vertex III* y su receptor *Transponder T3*. La anchura de copa se medido con una cinta métrica (Imagen 18).

Tanto para la medición de los diámetros, como para la de anchura de copa, se han realizado dos mediciones, siempre en dirección Norte-Sur y Este-Oeste, mediante la de una brújula.

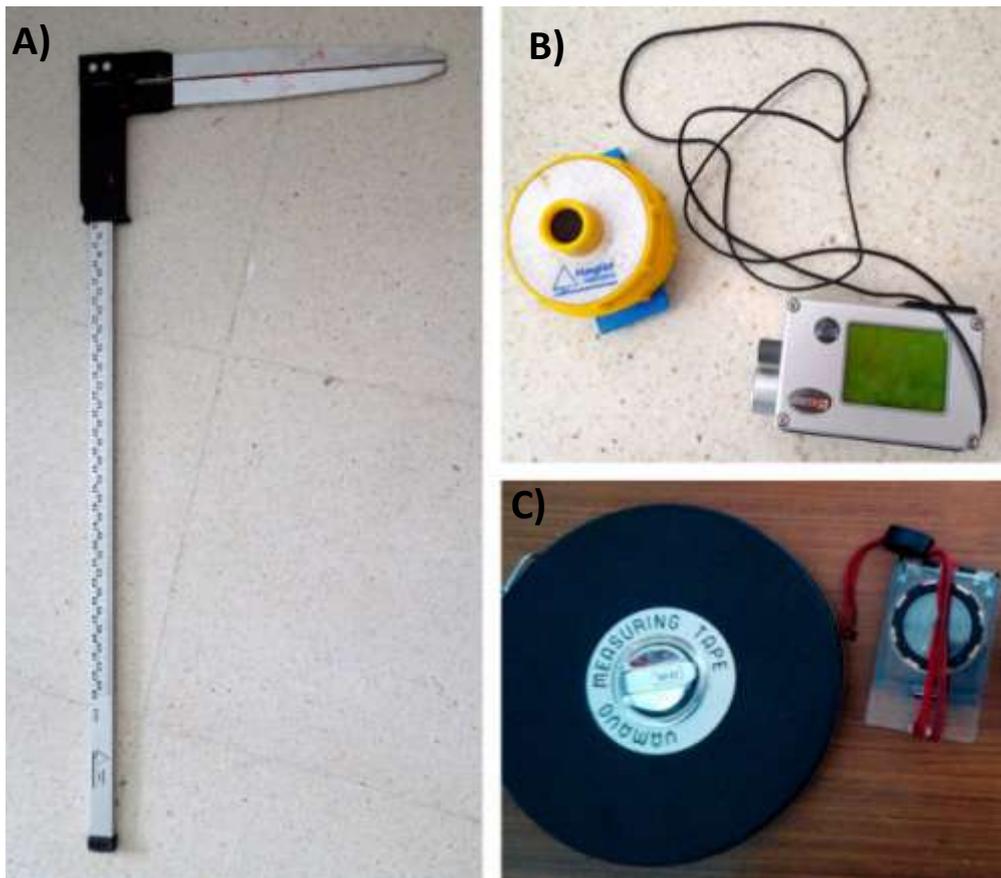


Imagen 18. A) Forcípula utilizada para medir los diámetros normales. B) Hipsómetro *Vertex III* y *Transponder T3* utilizados para medir las alturas totales de los árboles y las alturas de copas. C) Cinta métrica para medir la anchura de copa junto con la brújula utilizada para medir en las direcciones Norte-Sur, Este-Oeste, de los diámetros y anchuras de copa.

En cada una de las siete parcelas estudiadas con una media de 40 árboles por parcela, se ha medido la altura y el diámetro normal, tardando una media de 50 minutos en cada una, y siempre con ayuda de al menos tres personas.

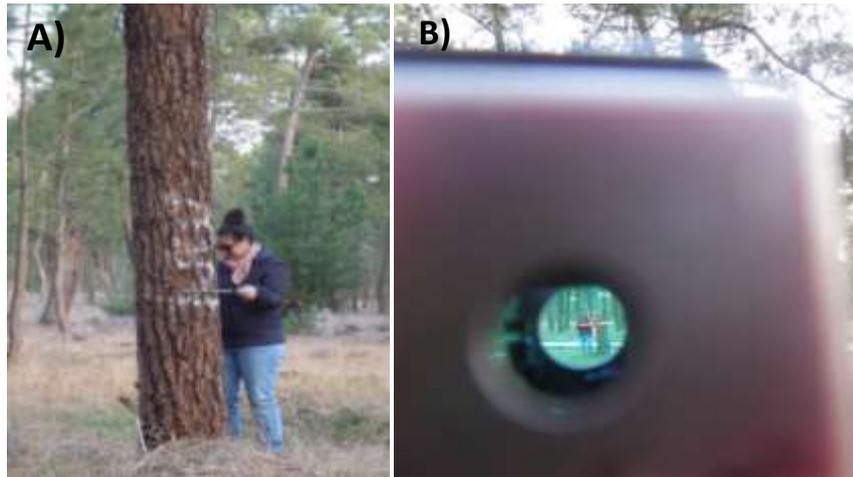


Imagen 19. **A)** Caracterización de la masa a través del uso de forcípula para la medida de los diámetros, **B)** Uso del hipsómetro para la medida de alturas y alturas de copa.



Imagen 20. Toma de datos de la anchura del diámetro de copa con cinta métrica.

2.3. Trabajo de Gabinete

Para el procesado de datos tanto el escáner terrestre como del vuelo del RPAS se ha utilizado un ordenador tipo *Workstation* Hp Z800 con 24 Gb de memoria RAM, procesador Intel Xeon X5650 de 6 núcleos a 2,67Gh y tarjeta gráfica NVidia GeForce GTX 650. El equipo utilizado tiene que ser muy potente debido a que los programas necesarios para el tratamiento y procesado de datos requieren de muchos recursos para poder gestionar la gran cantidad de imágenes y nubes de puntos que ocupan un gran espacio en el ordenador.

2.3.1. Datos LiDAR Terrestre

Como ya se ha comentado, las tomas realizadas por el escáner terrestre se almacenan en una tarjeta SD, y se vuelcan en el ordenador. Los escaneos se han abierto con el programa informático propio del escáner terrestre utilizado, llamado *FaroScene* (versión 5.2). Este programa en una primera etapa del proceso, ha sido utilizado para visualizar y alinear las nubes de puntos 3D tomadas en campo. Se debe tener especial precaución al realizar cualquier operación en este programa ya que su principal inconveniente es que carece de la opción deshacer, esto implica que en caso de dar un paso equivocado, es obligado cargar nuevamente las nubes de puntos y los tiempos de carga de los datos en la aplicación son muy largos ya que para ello realiza una conversión de los datos crudos del escáner en otros que son legibles por el software en cuestión.

Este programa también permite generar imágenes panorámicas esféricas de alta resolución a partir de la nube de puntos obtenida en cada escaneo. También permite exportar los puntos como archivos *.ptx* con los datos en este formato (estándar abierto creado por *Leica Geosystems*).

Una vez terminado este proceso, se pasa a una segunda etapa de procesamiento con el programa *Polyworks versión 12.1.3 (64 bits)*, con el que se ha realizado el resto de operaciones, las cuales se detallan en el punto 2.3.3.1. de este mismo capítulo.

La Ilustración 1. muestra de forma esquemática los pasos a seguir desde la toma de datos en campo, hasta la obtención de las nubes de punto (resultados).

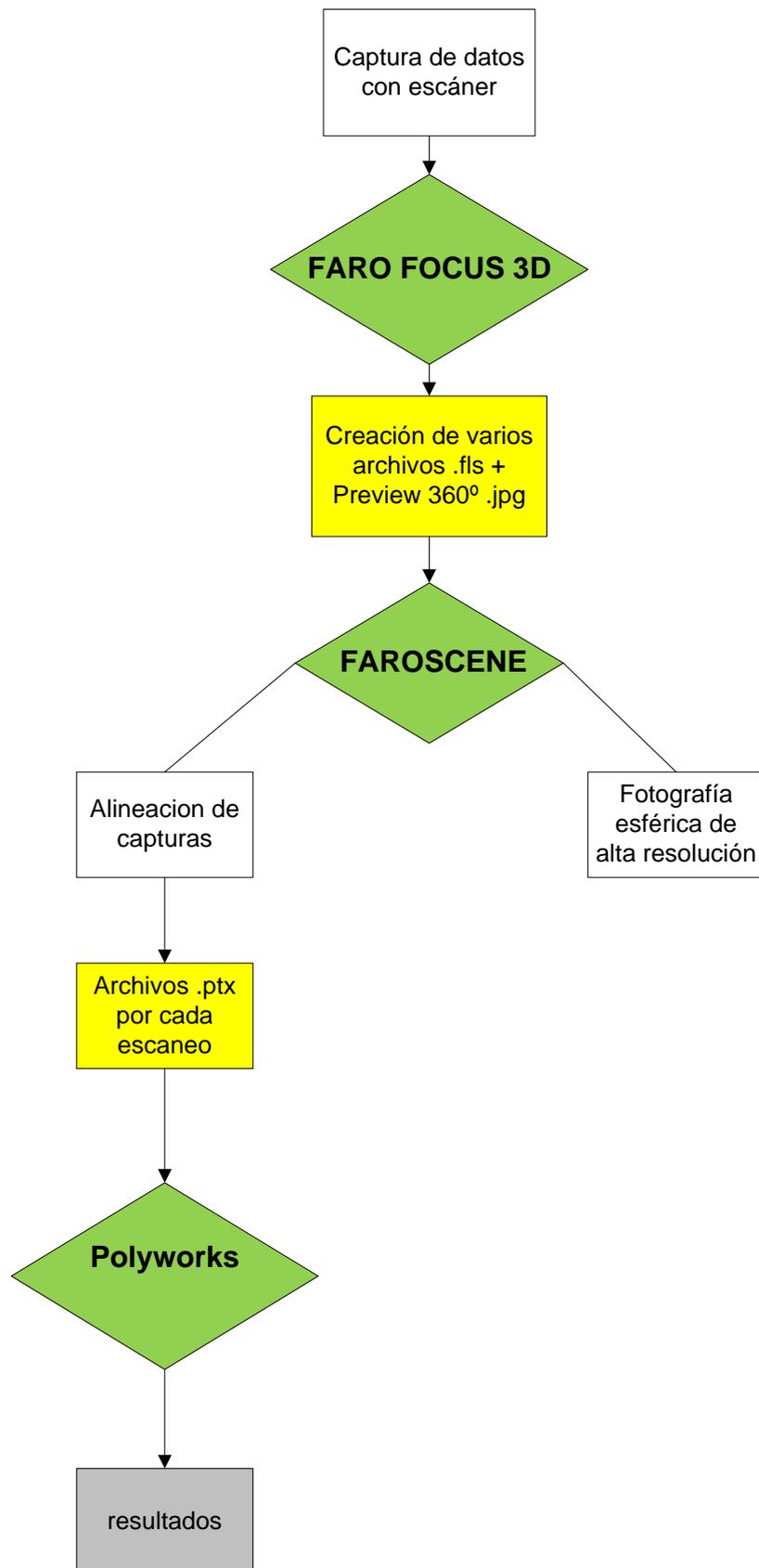


Ilustración 1. Diagrama de flujo de los pasos seguidos desde la toma de datos en campo hasta su procesado en gabinete.

Para la alineación de las imágenes con *FaroScene* se identifican y marcan las esferas colocadas en campo. El programa indica la calidad de reconocimiento de las esferas superponiendo sobre ellas los mismos colores rojo, amarillo y verde según la calidad sea mala, regular o buena respectivamente. En este trabajo se han tomado como válidas las reconocidas en color verde y amarillo y se desecharon las esferas marcadas en rojo.

Según se van abriendo las imágenes y marcando las esferas, el programa es capaz de ir reconociendo cada una de ellas, que, con anterioridad, han sido marcadas desde otras tomas. Éstas aparecen marcadas en violeta por *FaroScene* (ver Imagen 21.) es decir, se van uniendo y posicionando más o menos en el mismo plano, construyendo así la vista 3D de la parcela.

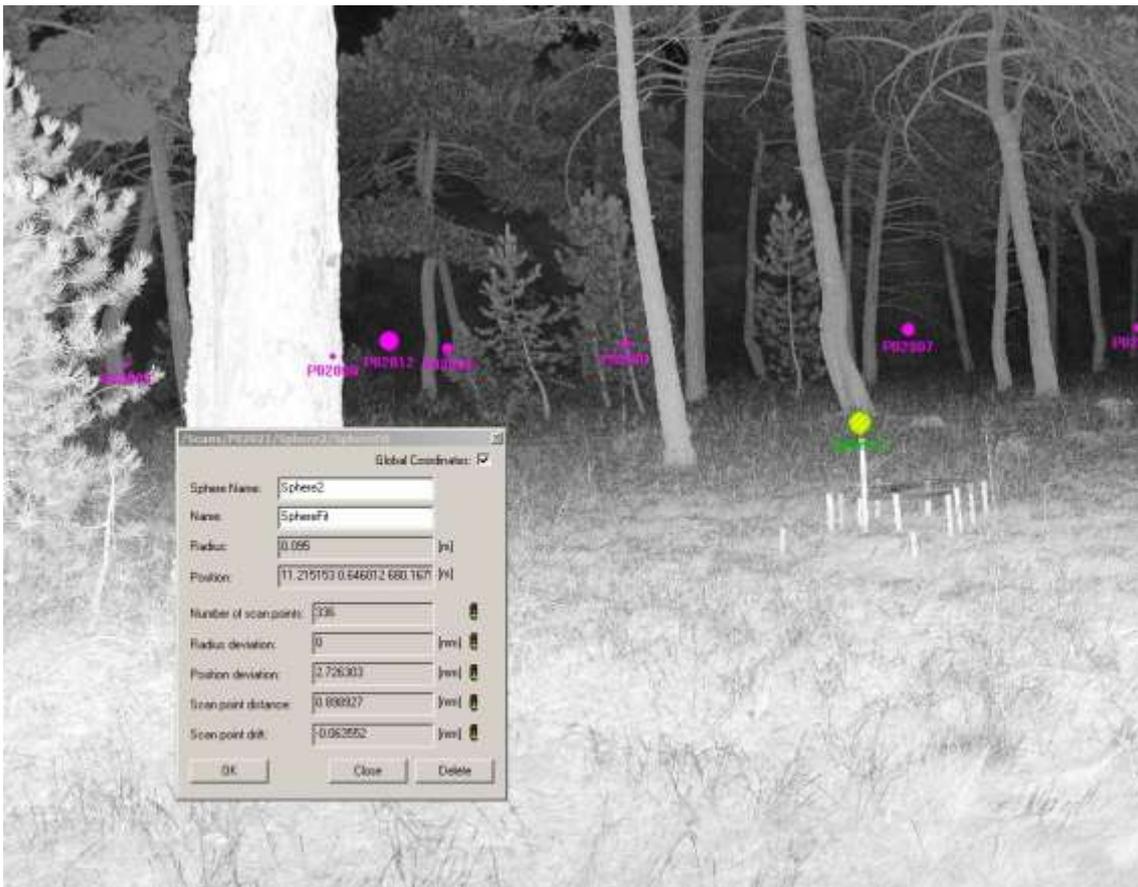


Imagen 21. Visualización de las capturas tomadas en campo por el escáner terrestre a través del programa informático *FarosScene*. En violeta aparecen las esferas ya reconocidas, alineadas y nombradas por el programa y en amarillo un ejemplo de reconocimiento de esferas. El color verde indica que la cantidad de nubes de puntos reconocibles de la esfera es buena.

Una vez terminada la alineación, se puede observar el posicionamiento exacto que se hizo en campo en cada escaneo (ver imágenes 22 y 23.).

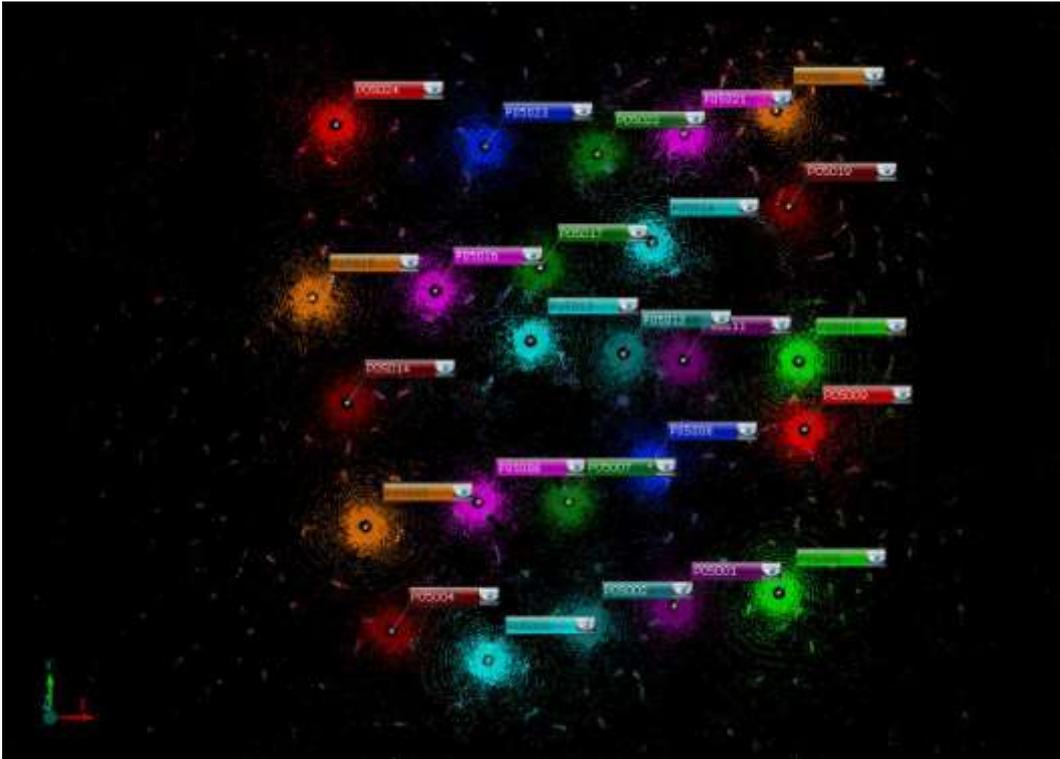


Imagen 22. Visualización en planta de una de las parcelas en el programa *Faroscene*, tras la alineación de todos los escaneos realizados.

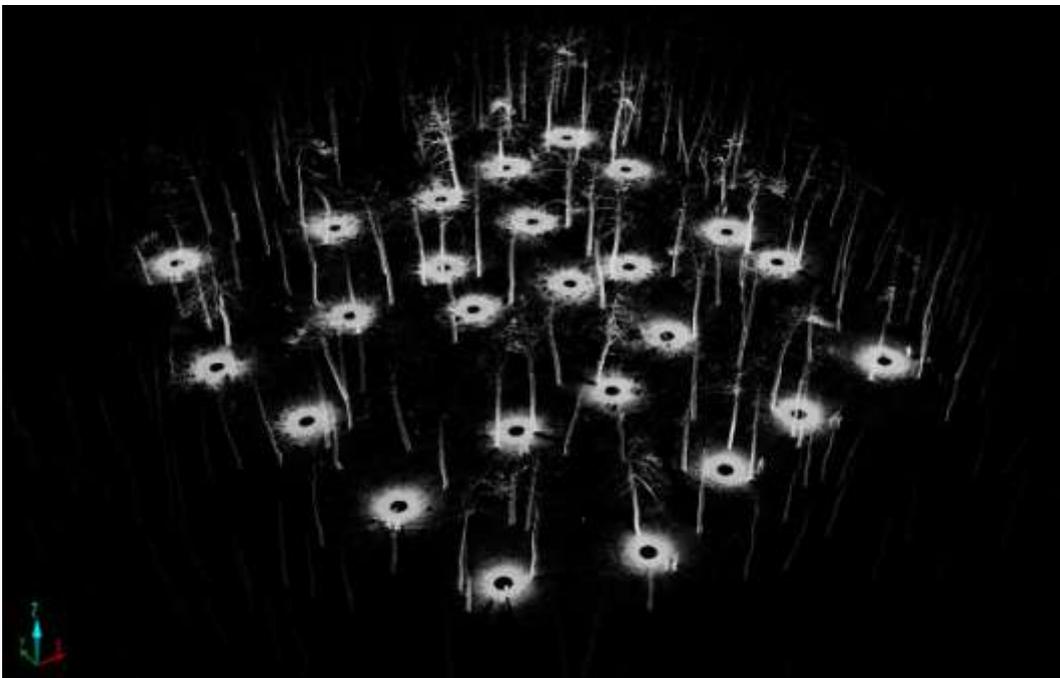


Imagen 23. Visualización en perspectiva de una de las parcelas en el programa *Faroscene*, tras la alineación de todos los escaneos realizados.

2.3.2. Datos Fotogramétricos aéreos y terrestres

Tanto para el procesado de datos de las fotos tomadas con el RPAS, así como las tomadas con la cámara réflex del tronco se aplicó la misma metodología.

Primero ha sido necesario procesar las fotografías. Para ello se ha utilizado el programa *OLYMPUS Viewer 2*. Gracias a que las imágenes fueron tomadas en formato crudo, el programa ha permitido realizar un revelado digital, es decir, corregir la intensidad de la luz, así como deformaciones geométricas, aberraciones cromáticas, viñeteo, etc. que podrían dificultar la reconstrucción tridimensional más adelante.

Las imágenes se han guardado en formato **.JPEG* (con descriptores completos en formato EXIF, *Exchangeable image file format*, que es un formato de metadatos asociado a las fotografías que nos permite no perder detalle de la cámara con la que fueron realizadas y evitar así pérdida de información.

Una vez procesadas las fotografías, se ha utilizado el programa *Agisoft PhotoScan Professional (64 bit) versión 1.0.3*. Se trata de una aplicación fundada en los últimos desarrollos de algoritmos de “reconstrucción 3D densa basada en múltiples vistas” (*Structure From Motion+Multiple View Stereo*) que permite el cálculo automático de las orientaciones de cámara y parámetros ópticos de las lentes, permitiendo la obtención de nubes de puntos similares a las producidas por los sistemas LIDAR a partir de la correlación masiva de píxeles en imágenes con regiones de superposición.

Para que el programa sea capaz de realizar la reconstrucción tridimensional a partir de las imágenes capturadas, primero se relacionan las imágenes entre sí calculando la posición de las cámaras desde donde estas fueron tomadas. Realiza tres tipos de orientación: una orientación interna, otra relativa y una absoluta (estas dos últimas se suelen agrupar en la llamada orientación externa).

El primer paso que sigue el programa es buscar puntos característicos, estos son, puntos que tienen un patrón singular que los hace susceptibles de ser reconocibles en varias imágenes. El programa selecciona por defecto 40.000 de estos puntos y trata de encontrar sus homólogos en el resto de fotografías. (Ver Imagen 24).

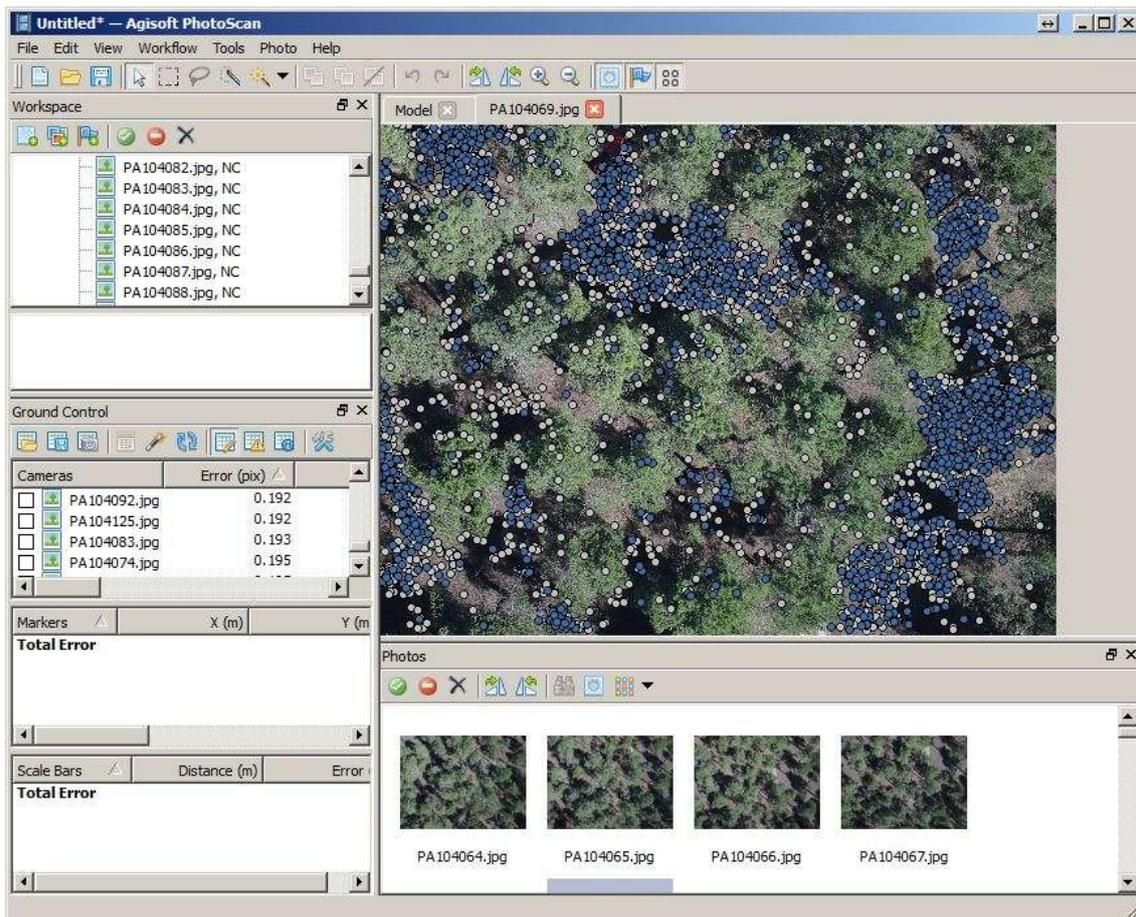


Imagen 24. Captura de pantalla principal del programa *Agisoft PhotoScan Professional* (64 bit). Los puntos en azul representan las parejas de puntos encontradas y las blancas sin encontrar.

Una vez encontradas esas parejas de puntos, se hace posible el cálculo de las posiciones de la cámara (orientación externa), así como el cálculo de las deformaciones y características geométricas de las imágenes (orientación interna) en un solo paso.

Cuando las imágenes están ya orientadas, se puede empezar el proceso en sentido contrario (restitución) que consiste en obtener las coordenadas geográficas tridimensionales para las proyecciones de cada uno de los píxeles de todas las imágenes de lo cual se deriva una nube de puntos densa (ver Imágenes 25 y 26).

Con esa nube de puntos densa se obtiene por triangulación una malla que representa el modelo digital de la superficie, que servirá a su vez para generar la ortofotografía. Así mismo este modelo tridimensional servirá para obtener información volumétrica del tronco y de la masa forestal capturada.

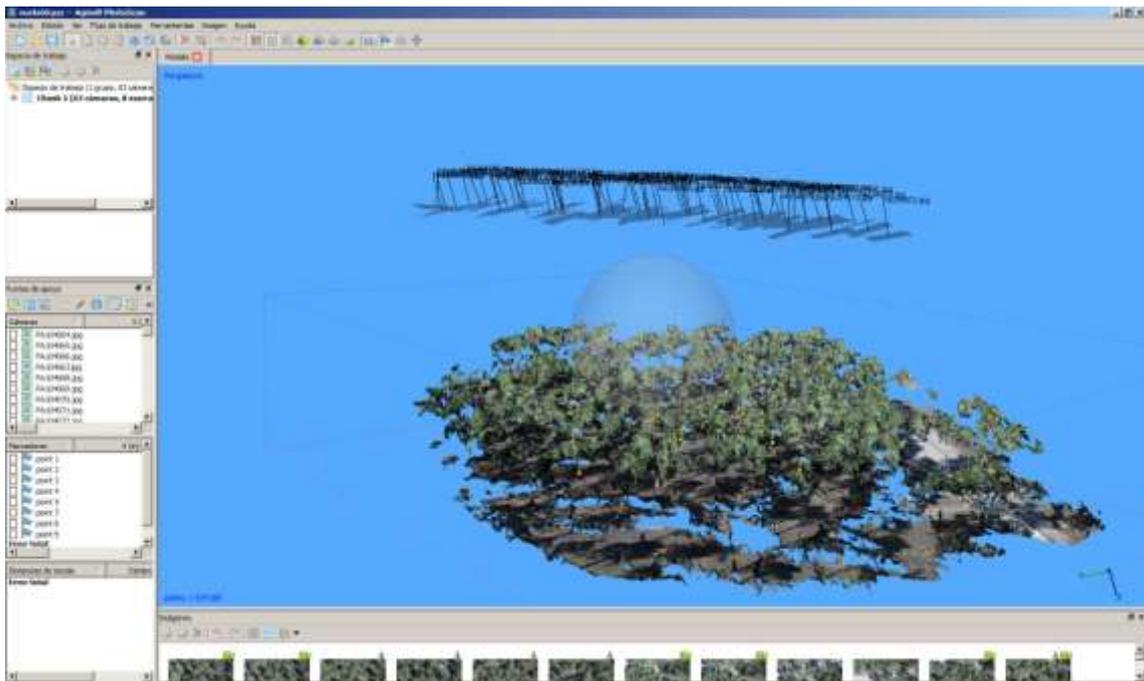


Imagen 25. Captura de pantalla del vuelo realizado a 60 metros de altura una vez creada la nube de puntos densa a través programa *Agisoft PhotoScan Professional (64 bit)*.

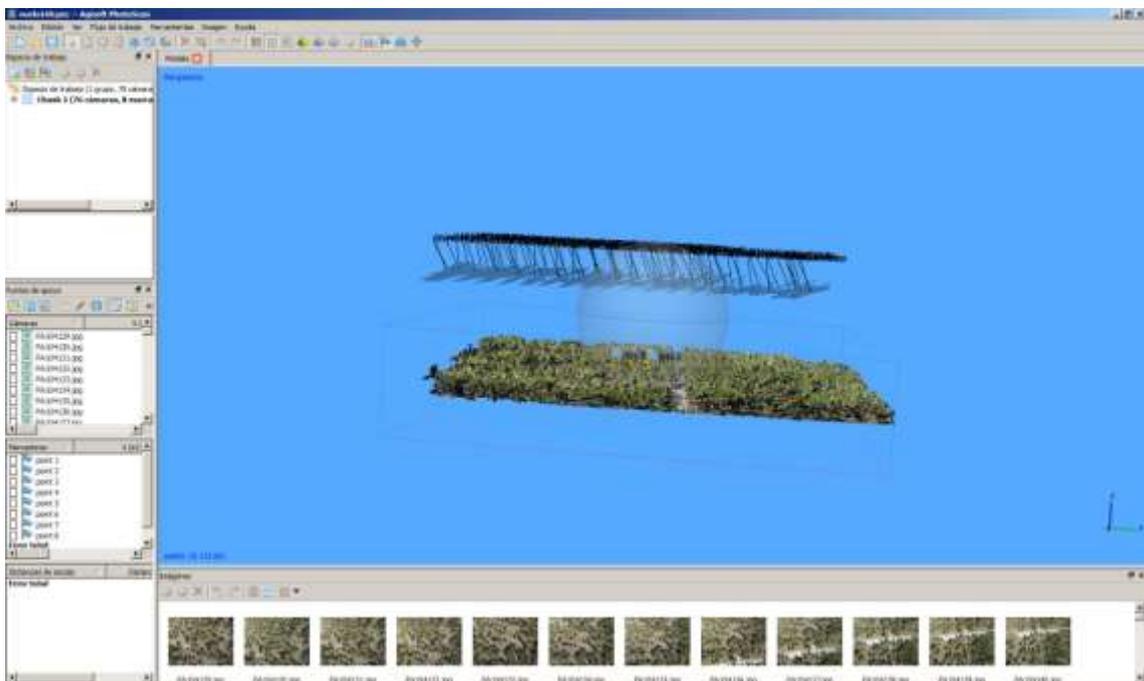


Imagen 26. Vuelo realizado a 160 metros de altura una vez creada la nube de puntos densa a través del programa *Agisoft PhotoScan Professional (64 bit)*.

2.3.3. Obtención de resultados

Una vez obtenida la orientación de las nubes de puntos tanto en LiDAR como en fotogrametría se procedió a la extracción de resultados.

2.3.3.1. LiDAR terrestre

Como se ha comentado anteriormente, una vez obtenida la orientación de las nubes de puntos a través de programa *FaroScene*, el resto de operaciones se ha realizado con el programa *Polyworks versión 12.1.3 (64 bits)*, que a diferencia del primero, éste permite editar las nubes de puntos ocultándolas, borrándolas, además de permitir crear puntos, líneas, figuras geométricas, etc, y la posibilidad de poder recuperar los puntos editados en cualquier momento, lo cual supone una gran ventaja.

Dado que el LiDAR terrestre tiene un alcance de 180 m, el primer paso ha sido realizar una selección de los árboles que realmente entran en cada parcela. Esta selección se ha visto facilitada gracias a que los árboles habían sido previamente georreferenciados para los otros estudios que se realizan en la zona. El programa permite copiar una selección de nubes de puntos, marcar ese conjunto con una etiqueta y nombrarla como se desee, por lo tanto, cada vez que se identificaba un árbol, se copiaba en otro archivo .ptx. y etiquetando con el mismo número cardinal que tenía en campo, para facilitar así, su identificación en las operaciones posteriores.

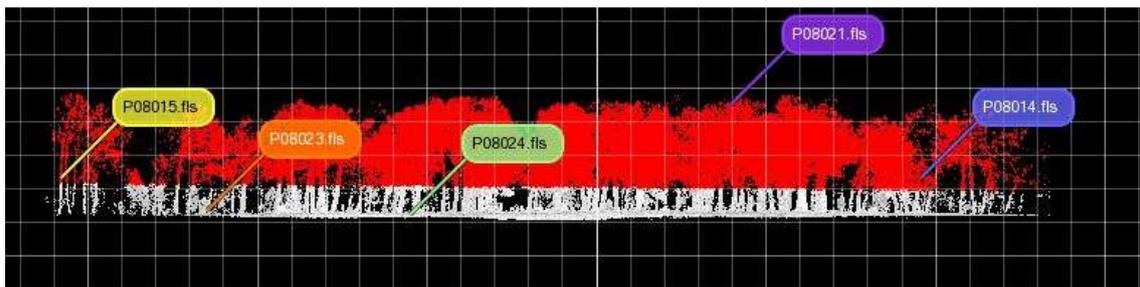


Imagen 27. Depuración de datos. Los puntos marcados en color rojo son los datos a eliminar.

Una vez terminado este proceso se procedió a dividir el proyecto en pequeños archivos, es decir, se creaba un archivo .ptx distinto del original incluyendo solamente los árboles conformantes de cada una de las parcelas, los cuales a su vez se encontraban en subarchivos de nubes de puntos individuales (ver Imagen 28). De esta manera se mejoraba la operatividad y reducía el tiempo de trabajo pues, por un lado al haber menos volumen de datos el programa trabajaba más rápido, y por otro, al estar los árboles identificados y separados unos de otros en diferentes subarchivos, el aislamiento de los árboles resultaba sencillo, ya que simplemente había que seleccionar la nube de puntos del árbol sobre el que quería trabajar y ocultar el resto.

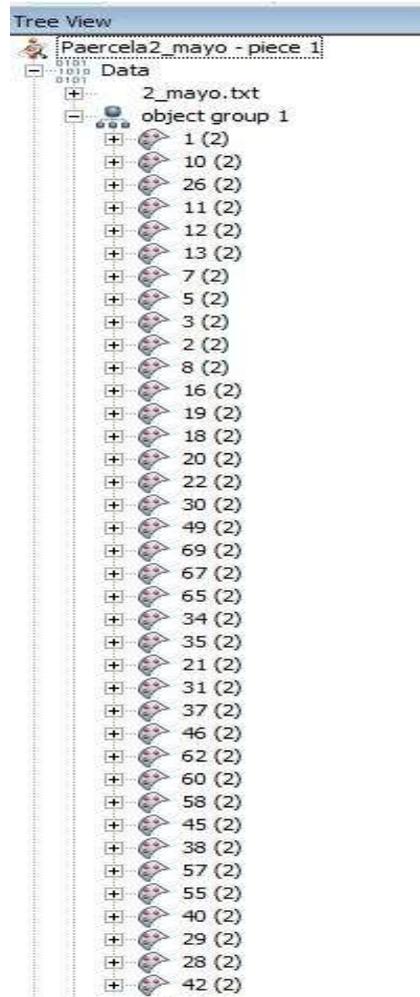


Imagen 28. Ejemplo de cómo se separaron las nubes de puntos en los diferentes árboles que conforman la parcela 2

– MEDIDAS DENDROMÉTRICAS

Individualización de los árboles

Cada árbol venía identificado por una nube de punto. De cada uno de los árboles, se ha exportado una imagen de la vista de perfil y de planta (Ver imagen 29)

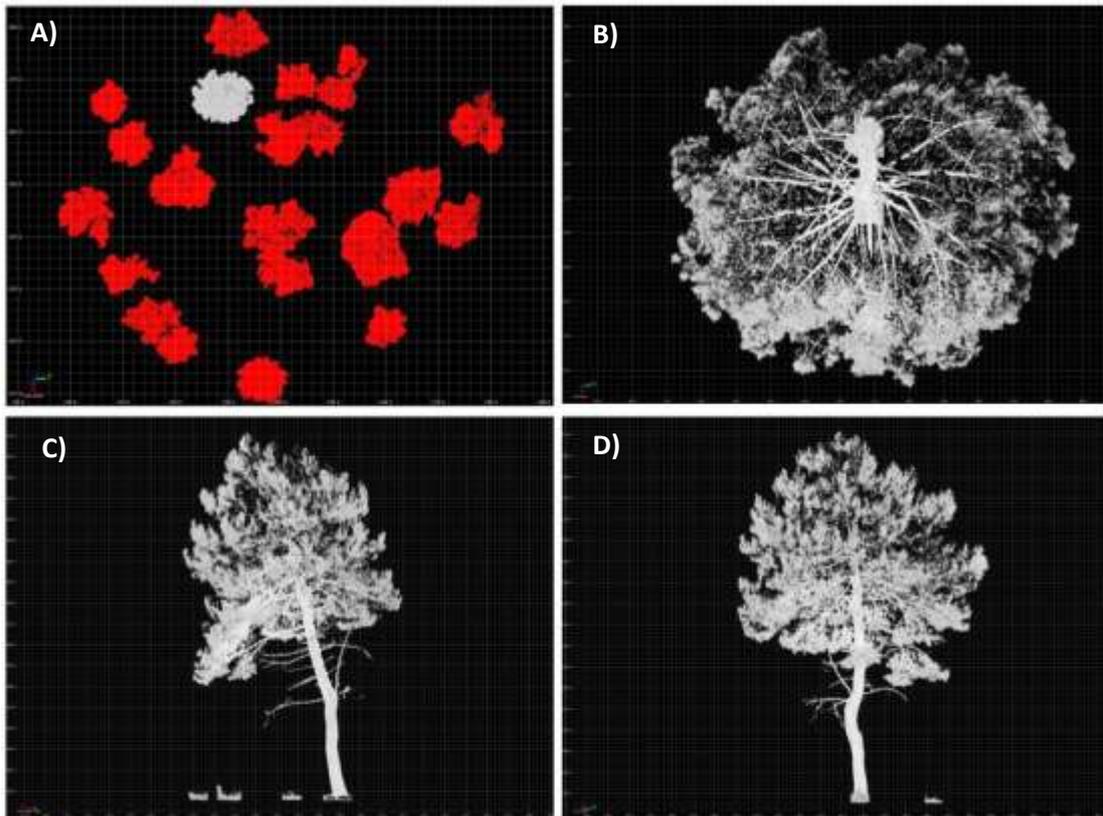


Imagen 29. **A).** Muestra la selección de la nube de puntos. El color rojo indica los puntos que se desean editar. **B).** Vista en planta del árbol seleccionado. **C)** y **D)** muestran dos alzados diferentes del mismo árbol.

Diámetro normal

Gracias a que la zona de estudio es un lugar prácticamente llano sin ningún tipo de pendiente pronunciada, se ha creado un plano general (un plano de corte) a 1,3 m de altura respecto de la base de los árboles, para así, realizar un corte transversal sobre ellos y definir el diámetro normal de cada uno (ver imagen 30). A continuación, se ha creado un clip de corte, el cual permite visualizar la longitud de nube de puntos que se desee. En este trabajo el clip de corte creado fue de 0,002 cm.

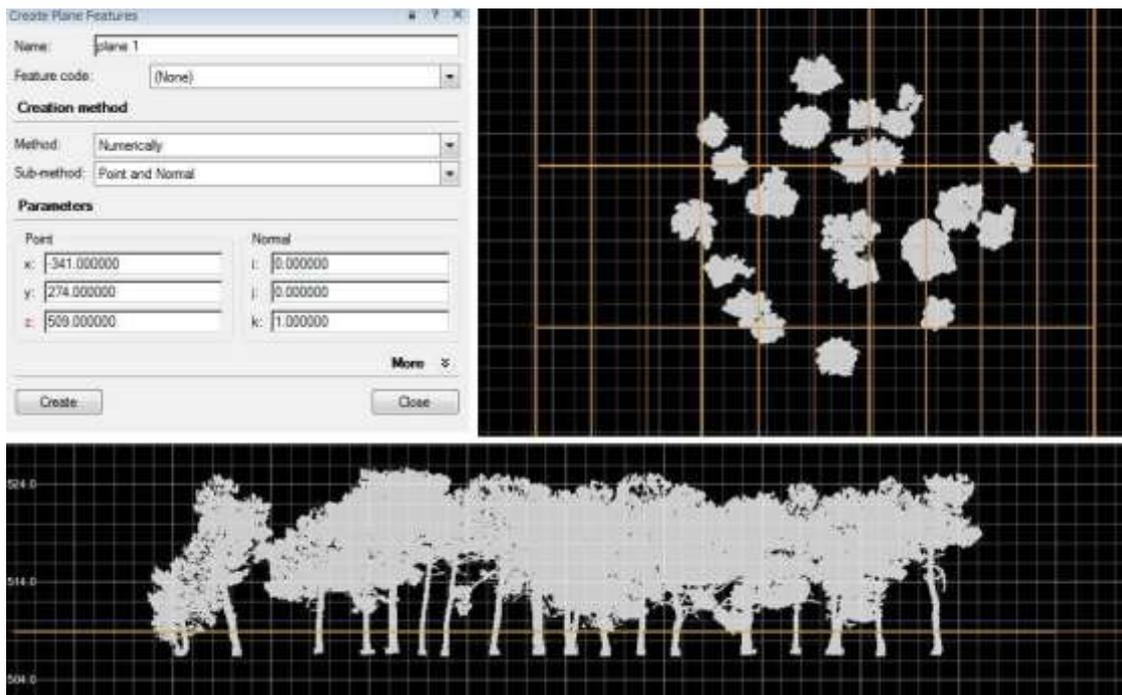


Imagen 30. Creación de un plano de corte. Arriba Izq. Cuadro de dialogo para configurar las coordenadas del plano a crear. Arriba Dcha. Vista de la planta una vez creado el plano. Fotografía inferior. Vista de perfil una vez creado el plano.

Exportación y medición de altura y diámetro normal

Una vez se obtienen los árboles aislados, el programa permite exportar los datos en formato .PNG, sin embargo esta exportación debe hacerse de forma manual y árbol por árbol.

Para conseguir las medidas dendrométricas buscadas, se han probado dos metodologías diferentes para la medición de los árboles.

La primera metodología probada se ha realizado a través del programa *AutoCAD 2014*. Se exportaron cuatro imágenes diferentes de cada árbol desde el programa *Polyworks*; dos vistas de perfil con orientación Norte-Sur y Este-Oeste (altura del árbol), vista en planta (copa del árbol) y vista en planta de la sección del tronco a 1,3m (diámetro normal). Todas las imágenes fueron exportadas con la malla de trabajo que presenta por defecto *Polyworks*, para poder así escalar las imágenes en el programa *AutoCAD* y obtener las medidas dendrométricas buscadas (ver imagen 31). Sin embargo, esta metodología fue abandonada debido a la incapacidad de poder automatizar el programa lo que suponía un gran retraso en la obtención de resultados al tener que escalar de forma manual cada una de las imágenes. Aún así este programa ha permitido obtener resultados interesantes.

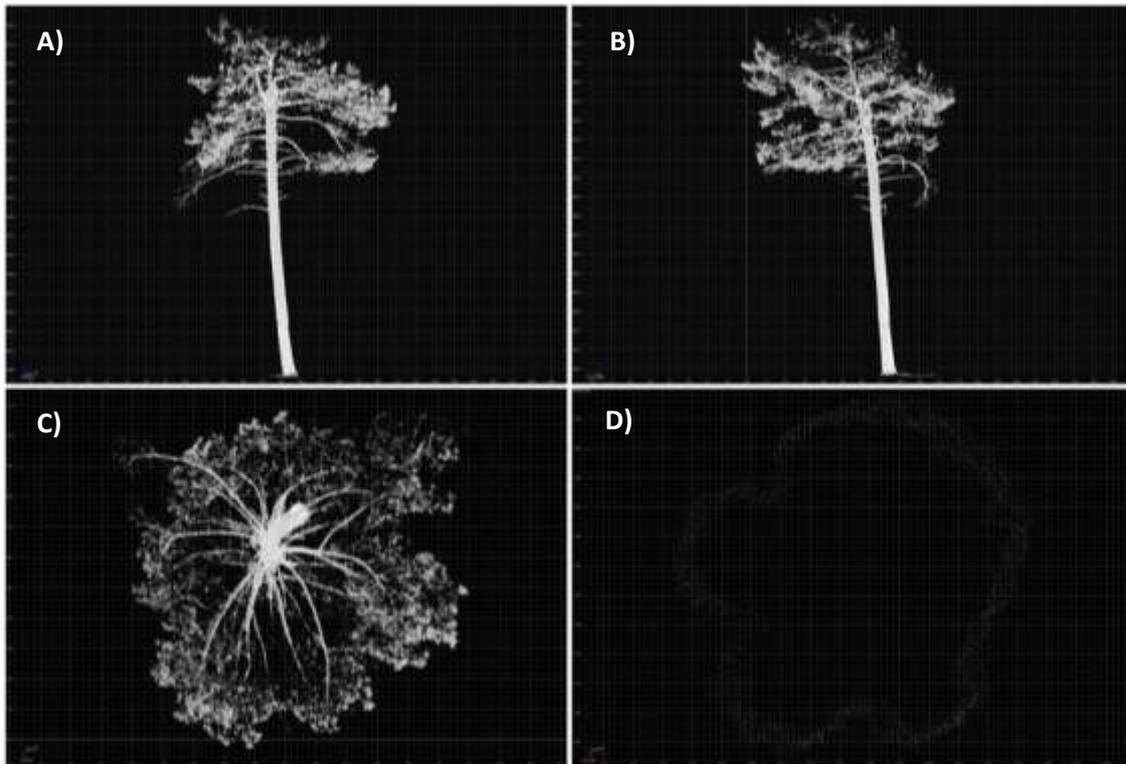


Imagen 31. Extracción de imágenes desde el programa *Polyworks*. **A)** Perfil Norte-Sur de un árbol. **B)** Perfil Este-Oeste. **C)** Extracción de la copa del árbol vista en planta. **D)** Diámetro normal en planta.

La segunda metodología de trabajo se ha realizado a través del programa *Adobe Photoshop. CS* versión 8.0.1. Igual que con el programa anterior se han exportado las mismas cuatro imágenes de cada árbol pero en esta ocasión sin la malla de trabajo y enmarcadas cada una de ellas dentro de un cuadrado de 1x1m para la imagen exportada del diámetro normal y un marco 25x25 m para las tres imágenes restantes (altura y copa) (ver Imagen 32). De esta manera se consigue obtener todas las imágenes con la misma escala y de esta manera poder automatizar la medida de los árboles como se describe a continuación

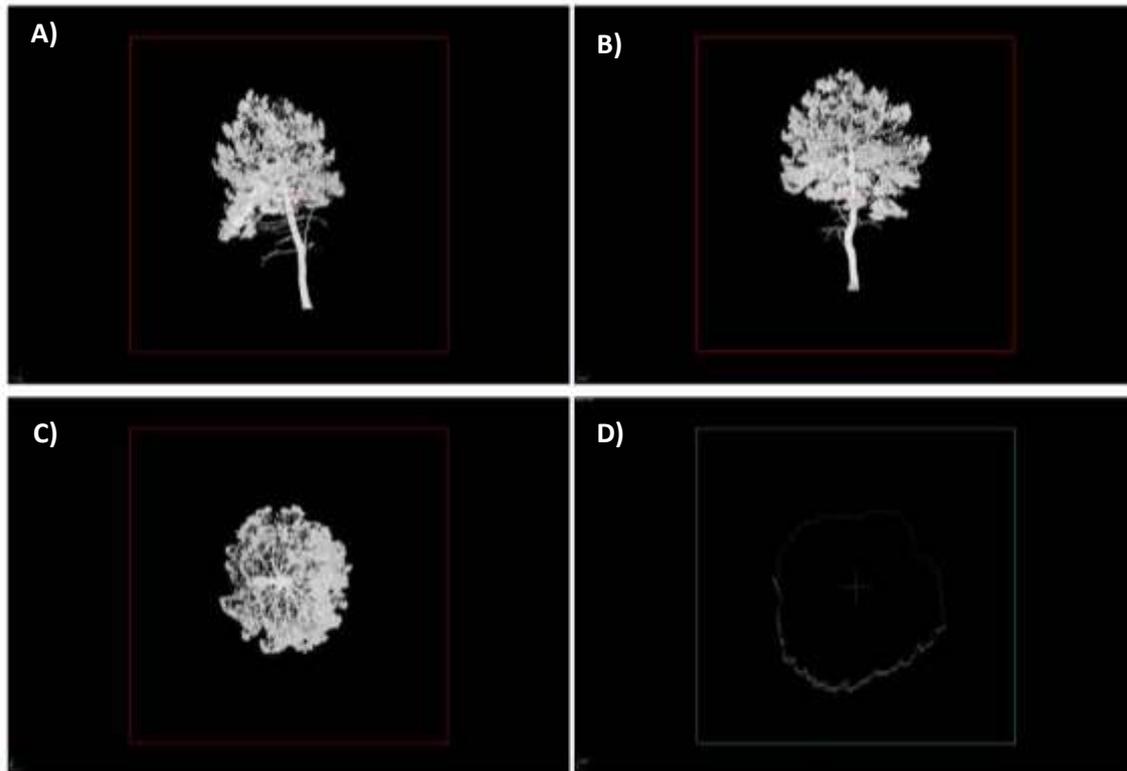


Imagen 32. Visualización de las imágenes exportadas desde Polyworks sin la malla de trabajo y con los cuadros de referencia. Las imágenes A),B) y C) son los cuadros rojos de 25x25m y la imagen D) el cuadro verde de 1x1m.

El programa *AutoCAD*, *Adobe Photoshop CS* permite crear “acciones de trabajo” que además se pueden aplicar a un “lote” o conjunto de imágenes seleccionadas (Ver imagen 33). Para ello es necesario que el lote de imágenes presenten las mismas características. Se han creado dos acciones llamadas “escalar_h_copa” y “escalar_dbh”, la primera se ha aplicado sobre las imágenes enmarcadas en los cuadros rojos de 25x25m y la segunda sobre los cuadros verdes de 1x1m.

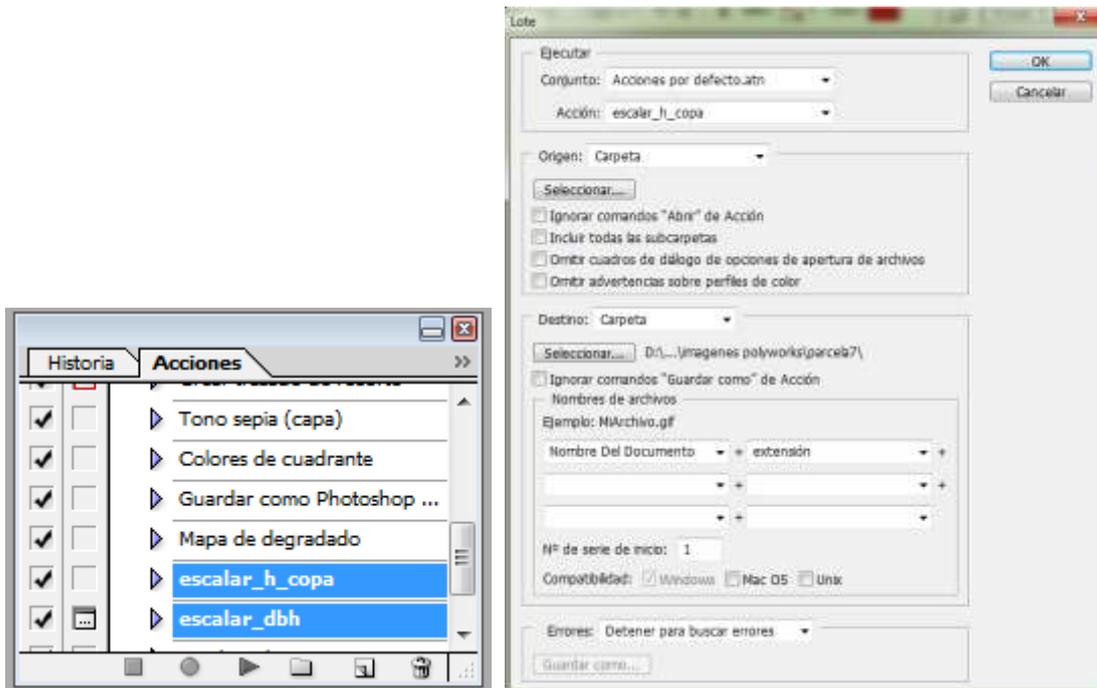


Imagen 33. Creación de una acción en Adobe Photoshop CS (Imagen izquierda) y su aplicación sobre un "lote" de imágenes seleccionadas (Imagen derecha)

Ambas acciones han realizado una primera separación de colores, del negro hasta el cuadro rojo o verde según el caso, a continuación se escalaba la imagen de tal manera que un pixel de la imagen representase un cm de la realidad, de esta manera, en una imagen de perfil, el alto de la imagen represente la altura del árbol, y el ancho el diámetro de copa. Análogamente, en la imagen del corte del tronco a 1,3 m, las dimensiones del archivo proporcionan los diámetros normales. Finalmente se realizaba una última separación de color del negro hasta el blanco (árbol). Así se puede proceder a medir las copas y diámetros de la misma manera que se ha realizado en campo, medidas perpendiculares en sentido Norte-Sur, Este-Oeste. La aplicación de cada acción sobre los lotes de imágenes ha supuesto una media de 1 minuto en conseguir los resultados de imagen finales como se muestran en la Imagen 34 (alturas, copa y diámetro).

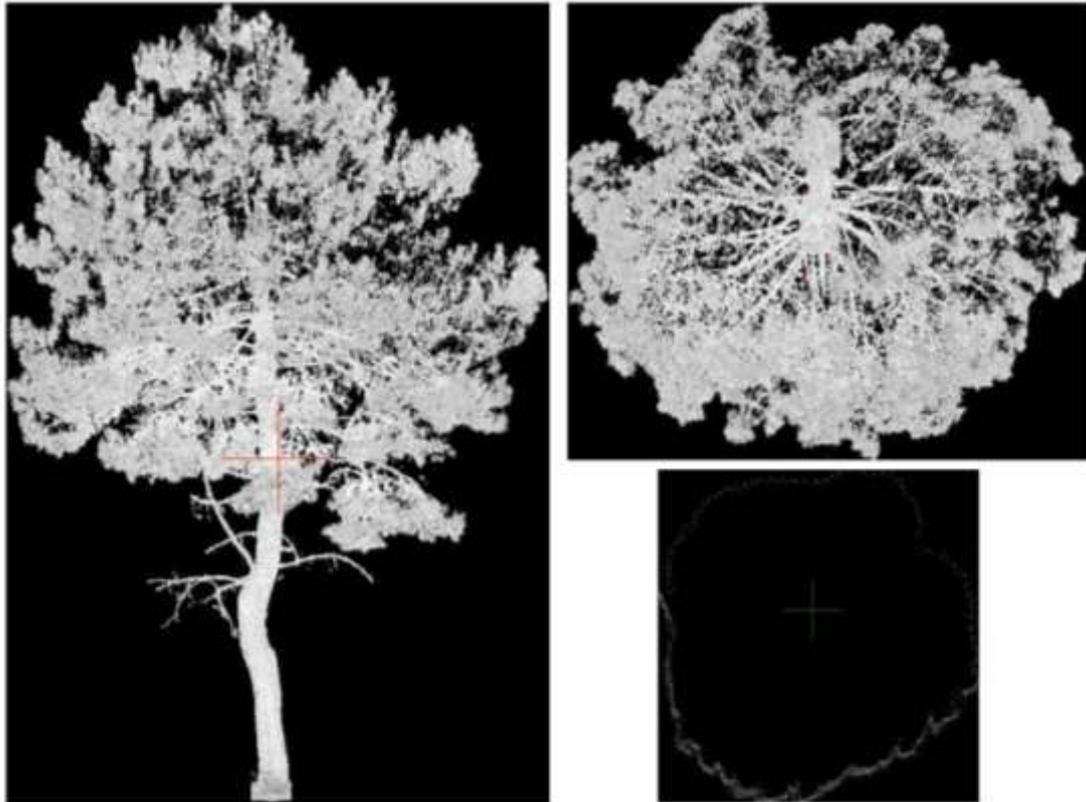


Imagen 34. Árbol ajustado por el programa Adobe Photoshop CS. Escalado y recortado hasta el primer punto de pixel donde empieza la imagen del árbol.

Para poder exportar los datos a una tabla de Excel y poder proceder a la comparación de las tecnologías consideradas en este trabajo con la metodología convencional, se ha utilizado el programa *XnView*, el cual permite exportar las propiedades de una fotografía o conjunto de ellas en un formato *.txt*, el cual a su vez se ha exportado a una hoja de cálculo Excel.

– MEDIDAS DASOMÉTRICAS

Para el cálculo del área basimétrica se ha utilizado nuevamente el programa *Polyworks*, el cual permite crear, como ya se ha comentado, diferentes formas geométricas y distribuir las de la manera que uno elija. Conociendo el marco de la parcela, 70x70m y queriendo crear cinco subparcelas circulares, se han realizado los cálculos geométricos pertinentes para definir el radio máximo de cada parcela, resultado ser de 25m (Ver imagen 35).

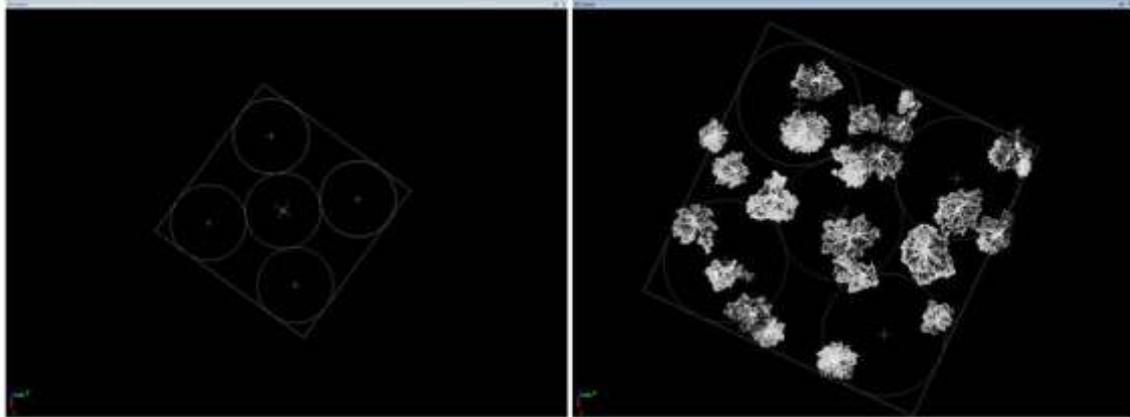


Imagen 35. Fotografía izq. Creación de cinco subparcelas circulares de radio 25m para el cálculo del área basimétrica. Fotografía dcha. Superposición de los árboles sobre las parcelas circulares recién creadas.

2.3.3.2. Fotogrametría aérea

Con esta tecnología la identificación e individualización de los árboles pertenecientes a cada parcela es complicada puesto que, como se observa en la imagen 36, la representación en 3D no es completa, tan sólo se obtiene la representación de la copa y el suelo. Por tanto, para poder caracterizar cada árbol se ha realizado una superposición de la nube de puntos creada con el escáner terrestre como se muestra en la imagen 37.



Imagen 36. Nube de puntos obtenida de un árbol a partir de fotogrametría.

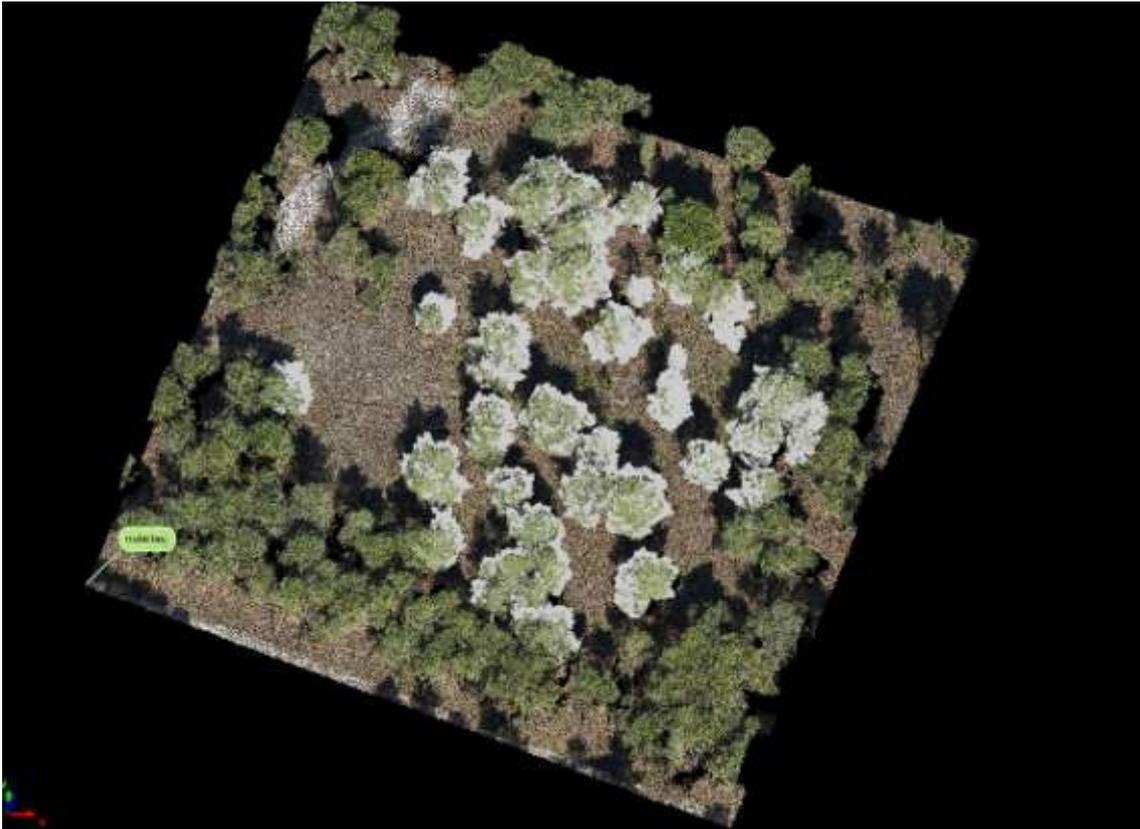


Imagen 37. Superposición de la nube de puntos del escáner terrestre con la fotogrametría aérea para poder definir los árboles pertenecientes a la parcela en la nube de puntos creada a partir de las fotografías tomadas por el RPAS.

Una vez realizada esta operación, se ha procedido a la medición de altura de cada árbol (única medida dendrométrica que se ha realizado con este método). Las medidas se han realizado desde el mismo programa *Polyworks*, puesto que permite marcar dos puntos y medir la distancia, en metros, que hay de un punto a otro (ver Imagen 38). En este caso la exportación de los datos a una hoja de cálculo Excel, se ha realizado de forma manual.

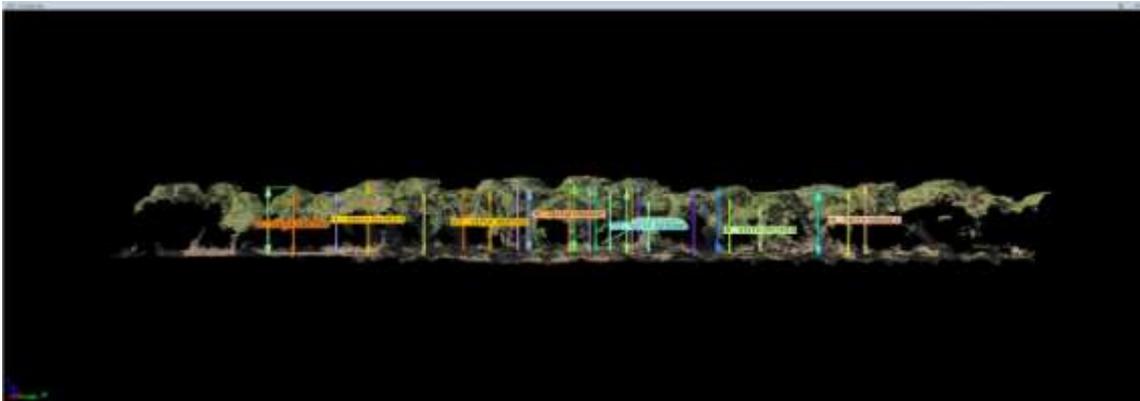


Imagen 38. Captura de imagen del programa *Polyworks*, que permite medir en metros la distancia existente entre dos puntos.

2.4. ANALISIS ESTADISTICO

Para la obtención de resultados estadísticos se ha utilizado el programa estadístico SAS 9.2 Enterprise Guide 4.2.

La hipótesis que se busca demostrar en el presente trabajo es la igualdad de los valores de las medidas dendro y dasométricas tomadas con las tecnologías alternativas LiDAR y Fotogrametría con respecto a los valores obtenidos de forma convencional mediante forcípula, hipsómetro y cinta métrica.

Para validar o no los datos de las variables dendrométricas y dasométricas obtenidas a través de la tecnología LiDAR y fotogramétrica comparados con los obtenidos a través de los instrumentos convencionales, se ha realizado un modelo de regresión lineal simple con cada una de las variables:

$$y = a + bx + \xi$$

Donde 'y' es el valor convencional, obtenido mediante forcípula, hipsómetro o cinta métrica para medir los diámetros normales, alturas y anchuras de copa respectivamente, 'a' el término independiente (*variable dependiente*), 'b' el término dependiente (pendiente), 'x' el valor obtenido mediante LiDAR o fotogrametría según el caso y ξ el término de error aleatorio del modelo, el cual verifica que los residuos son normales de media cero y varianza constante e independiente. Se busca por tanto, que, $a = 0$ y $b = 1$. Comprobando así que $y = x$.

Para evaluar la normalidad de los datos, se han comprobado con el test de normalidad de *Kolmogorov-Smirnov* además de ilustraciones residuales de normalidad

Cada uno de los programas utilizados se muestran en el Anejo 2.

3. RESULTADOS

De las siete parcelas escaneadas, tan sólo se han tratado los datos de tres de ellas. Se ha seleccionado una parcela de cada una de las tres intensidades de corta que existen en el lugar de estudio. Por tanto se han escogido y estudiado aleatoriamente las parcelas 2, 7 y 10, las cuales presentan una intensidad de corta en relación al área basimétrica del 25, 50 y 0% respectivamente. Esto ha supuesto un total de 102 árboles sobre los que se ha realizado los distintos análisis de comparación para la altura y el diámetro normal. Para las medidas de copa, como ya se ha comentado en el capítulo anterior, solamente fueron seleccionados 54 árboles de ese total.

A continuación se clasifican los resultados en dos categorías, por un lado la digitalización del lugar experimental, y por otro lado el análisis estadístico comparativo de las medidas obtenidas entre los métodos convencionales y las tecnologías LiDAR y fotogramétrica.

3.1. RESULTADOS LiDAR

La tecnología LiDAR ofrece como primer resultado la visualización en tres dimensiones del lugar experimental en gran detalle, pudiendo configurar la densidad de las nubes de puntos para mejorar dicha visualización, como se puede observar en la imagen 39.

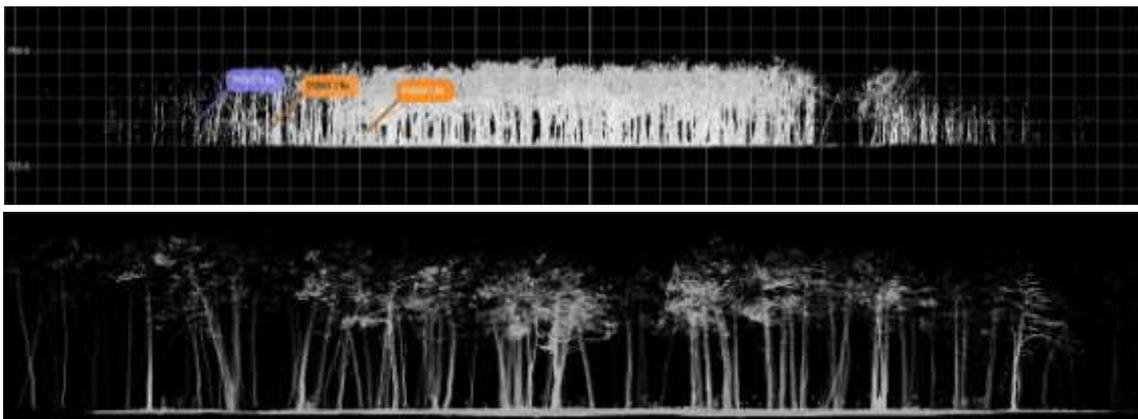


Imagen 39. Visualización de perfil a través del programa *Polyworks versión 12.1.3 (64 bits)* de una de las parcelas., Arriba con la configuración de máxima densidad de las nubes de puntos; abajo la misma visualización pero con una densidad menor.

Cómo se explica en el capítulo anterior, para la alineación de datos es necesario georreferenciar, de forma precisa, ciertos puntos en campo para poder realizar la colocación de escaneos en gabinete correctamente. Por tanto una vez orientadas la toma de escaneo con los puntos de referencia, todas las nubes de puntos se encuentran enmarcadas en un sistema de referencia único, mostrando así la distribución espacial de los árboles en su posición absoluta. (Ver Imagen 40).

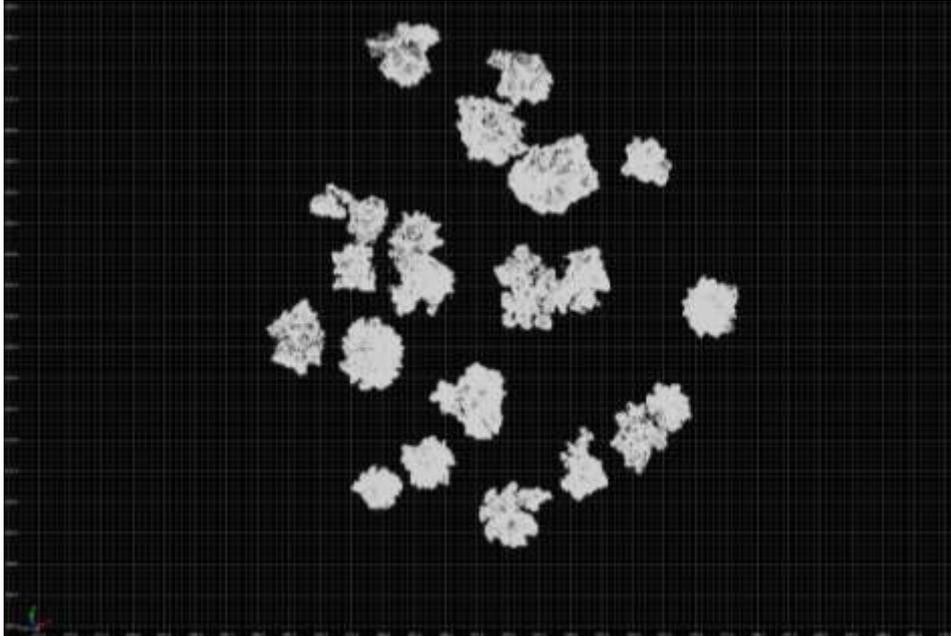


Imagen 40. Ejemplo de visualización en planta de una parcela una vez seleccionados solamente los árboles que pertenecen a la parcela. Dichos árboles se encuentran ya perfectamente georreferenciados.

Sin embargo, en ocasiones esta visualización puede no ser suficiente, pues la superposición de copas que con frecuencia sucede en campo dificulta la identificación de todos los individuos. Para ello La creación de los planos de corte, no sólo ha servido para obtener la sección normal del árbol, sino también es otra forma de definirla distribución espacial de los árboles. La Imagen 41 nos muestra la exactitud con la que se obtiene la distribución espacial de datos comparándolo con la georreferenciación realizada en estudios anteriores a través de la herramienta topográfica Estación Total.

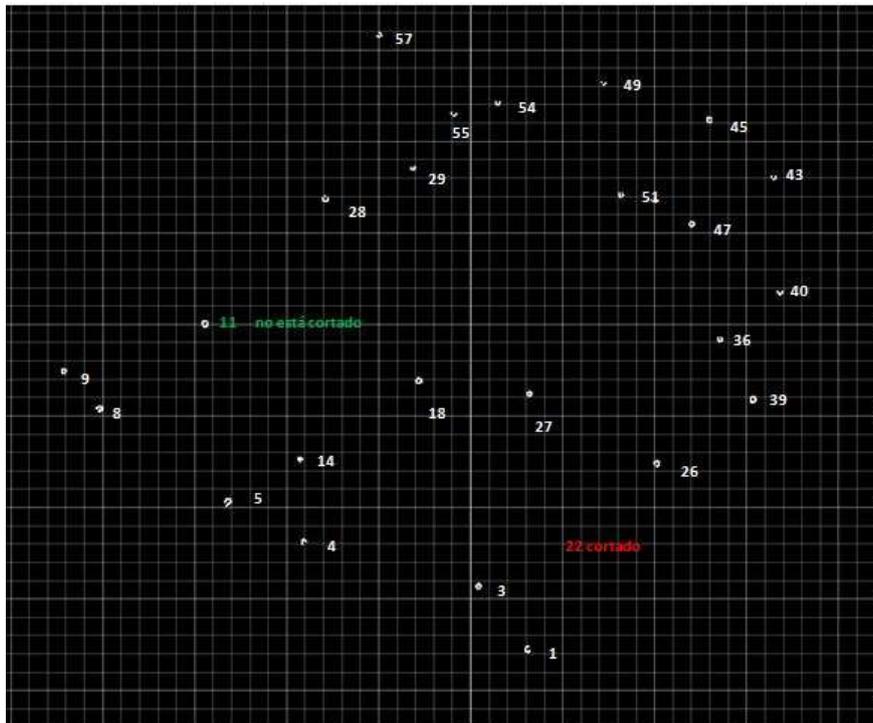
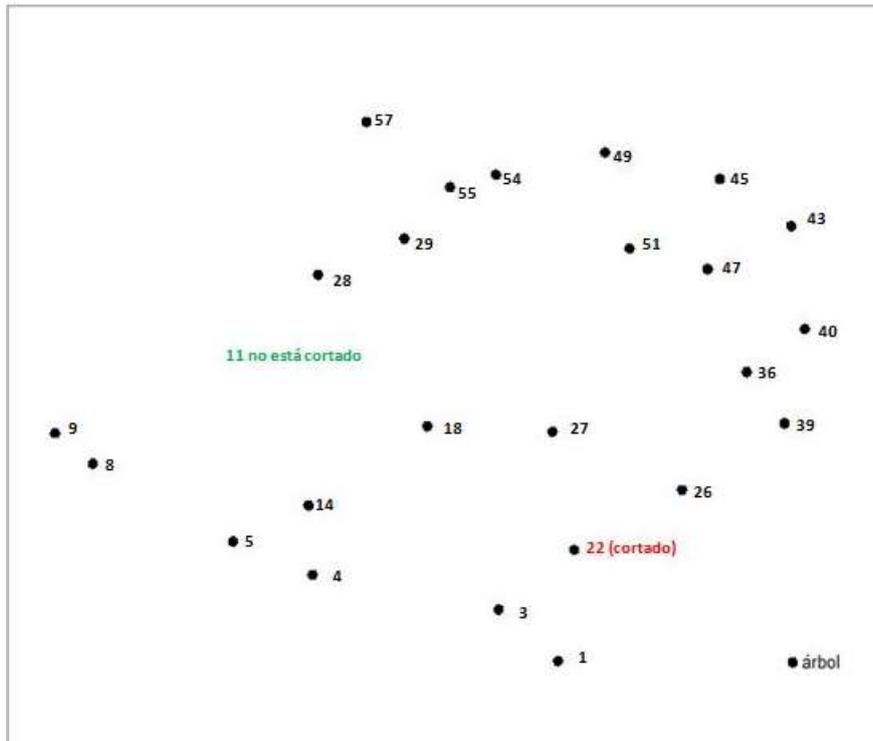


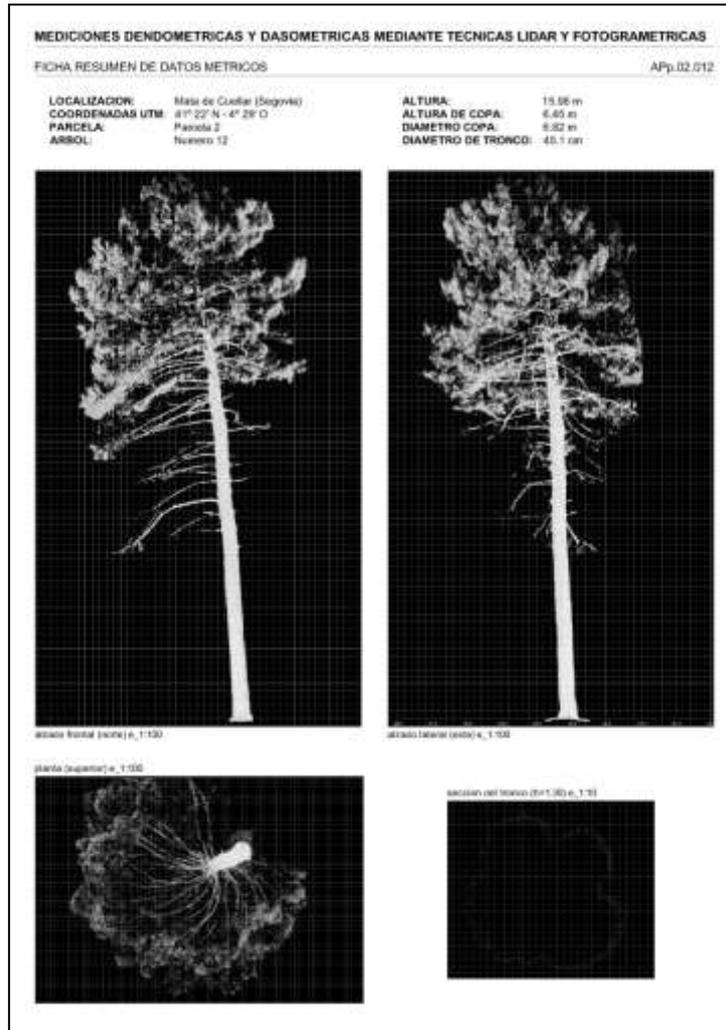
Imagen 41. Comparación de la obtención del posicionamiento georreferenciado en una de las parcelas estudiadas. La imagen de la derecha representa la georreferenciación obtenido a través de una estación total, y la imagen inferior la georreferenciación obtenida a través del LiDAR terrestre. El árbol 11 marcado en verde es un árbol no cortado que en la georreferenciación tradicional se marcó como cortado. Por el contrario el árbol 22, marcado en rojo resultó ser un árbol cortado no marcado como tal en la georreferenciación a través de la estación total.

LiDAR terrestre permite obtener una representación prácticamente exacta del árbol en 3D (Ver imagen 42).



Imagen 42. La representación del árbol 11 de la parcela 2, en 3D a través de la tecnología LiDAR terrestre es muy precisa.

A través de la exportación de imágenes, se ofrece la posibilidad de realizar fichas individualizadas de los árboles que faciliten el seguimiento de crecimiento de los árboles. La siguiente imagen muestra un ejemplo de ficha que se ha realizado (ver imagen 43). La misma imagen se puede ver más detallada en el Anejo 2.



3.2. RESULTADOS FOTOGRAMÉTRICOS

3.2.1. Datos Fotogrametría aérea

Como se ha comentado al principio de este capítulo, solamente se ha trabajado sobre las parcelas 2,7 y 10.

Por lo general, a través de esta tecnología, se ha podido obtener representación en 3D de la copa de los árboles, con excepción de algunos árboles en los cuales el programa no ha sido capaz de realizar dicha reconstrucción. Por otro lado, la copa del propio árbol obstaculiza la visualización del resto lo que ha impedido la representación del tronco. Por ello solamente se ha obtenido resultado de las alturas de los árboles (Ver imagen 44).

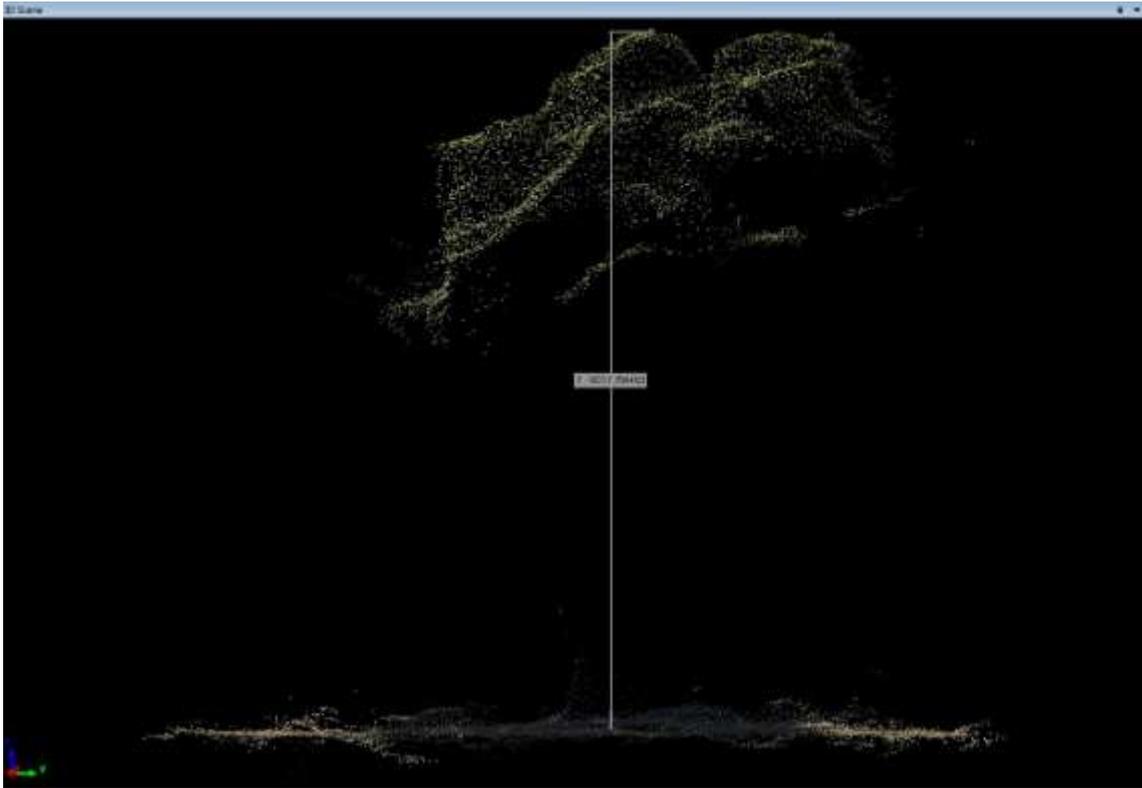


Imagen 44. A través de la fotogrametría realizada a 160m de altura, se ha obtenido la altura de cada uno de los árboles.

3.2.2. Datos Fotogrametría terrestre

La imagen 45 muestra el resultado obtenido a través de la colección de fotografías tomadas al tronco de un árbol elegido de forma aleatoria.



Imagen 45. Resultado nube de puntos de la fotogrametría terrestre.

3.2. ANALISIS ESTADISTICO

La Tabla 1 muestra un resumen de la estadística descriptiva de las variables medidas tanto en campo como a través de las nubes de puntos creadas a partir del escáner terrestre y las fotografías tomadas desde el RPAS (Altura total del árbol, Diámetro normal, Altura de copa, Anchura de copa y altura de máxima anchura de copa). En la tabla se puede observar que existe una correspondencia razonable entre las tecnologías alternativas y las convencionales.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las diferentes variables medidas con técnicas manuales (hipsómetro Vertex III y forcípula), LiDAR y Fotogrametría (Ins.). La tabla muestra: Número de árboles medidos (N), media (\bar{x}), valor máximo (Máx), mínimo (Mín) y su desviación estándar (σ). Para el caso de la altura medida a través de fotogrametría, el número de pies medidos a través de *Vertex III* son una submuestra de los 102 árboles de la primera columna.

Ins.	Altura				Diámetro Normal		Altura copa		Anchura copa		Área basimétrica	
	Vertex III	LiDAR	Vertex III	Fotogrametría	Forcípula	LiDAR	Vertex III	LiDAR	Cinta métrica	LiDAR	Forcípula	LiDAR
N	102	102	87	87	100	100	54	54	53	53	15	15
\bar{x}	15,58	15,52	15,59	14,75	49,00	48,38	8,37	8,43	8,69	9,62	85,35	85,80
Máx	21,40	19,45	21,70	18,68	79,15	81,70	13,10	14,32	14,30	13,83	163,06	162,79
Mín	7,20	7,56	7,20	7,08	11,50	9,50	4,70	4,83	2,30	3,20	21,85	17,24
σ	2,51	2,01	2,82	2,06	11,70	13,06	2,10	1,92	2,33	2,38	46,16	45,55

Para poder observar en más detalle la tendencia de los valores obtenidos a través del LiDAR terrestre y las fotografías, se ha realizado un modelo de regresión lineal simple sobre cada una de las variables medidas. La Tabla 2 muestra los resultados más relevantes (los resultados completos se encuentran en el Anejo 3)

Tabla 2. Resumen de los resultados estadísticos más característicos del modelo. En cada columna se especifica la variable dasométrica a la que hace referencia y cada fila representa el parámetro estadístico observado.

	Altura	Diámetro Normal	Diámetro de AB	Anchura copa	Altura copa	Área Basimétrica	Altura Fotogramétrica
Modelo de Regresión Lineal							
Pr> t 	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
F-Valor	237,09	1212,90	297,69	174,65	56,95	568,12	113,36
R² (%)	70,54	95,44	83,46	77,06	52,75	97,76	57,44
Estimador del parámetro							
Variable independiente	-0,7444	5,2223	272,1730	-0,0344	1,5479	-0,6266	0,5616
Pendiente	1,0538	0,8873	0,9049	0,8969	0,8083	1,0021	1,0248
Pr> t del Estimador del parámetro							
Variable independiente	0,4890	0,0003	0,0773	0,9594	0,0963	0,8795	0,6957
Pendiente	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Test							
Numerador	0,5914	<0,0001	0,1892	<0,0001	0,2049	0,9702	<0,0001
Test para la variable							
Numerador		<,0001	0,0749	0,1348			0,7971
Test de normalidad Kolmogorov-Smirnov							
Estadístico D	0,0588	0,1029	0,1955	0,0660	0,0925	0,1428	0,0610
Pr> t 	>0,1500	0,1131	<0,0100	> 0,1500	> 0,1500	> 0,1500	> 0,1500

Se ha considerado que los modelos tiene un buen ajuste a partir de un valor de R² superior al 50%. Este hecho ocurre en mayor o menor medida en el estudio de todas las variables.

El estimador del parámetro indica el sesgo de la recta y su p-valor si éste es significativo o no. La variable independiente son las medidas convencionales, y la pendiente la variable dependiente (LiDAR o Fotogrametría según el caso). A Través de estos valores se puede deducir si las tecnologías alternativas subestiman o sobrevaloran las medidas con respecto a las medidas realizadas en campo y en cuanto.

De forma general, se puede decir que el test del modelo se cumple para todas las variables al 99% de confianza (P-valor no significativo). Sin embargo el Diámetro normal, la Anchura de copa y la Altura total medida con técnicas fotogramétricas representan las excepciones pues el test resulta significativo, por lo tanto no se acepta la H₀. Para estos tres casos se ha estudiado de forma individual si la variable alternativa (LiDAR y Fotogrametría, según el caso) cumplen por separado la hipótesis, b=1. De esta manera se ha podido comprobar, que dicha igualdad se cumple para la anchura de copa (LiDAR) y para la altura medida con fotogrametría, pero no así para el diámetro normal.

Por el contrario, el estudio del área basimétrica es muy favorable, y dado que se trata de una variable dasométrica que depende del diámetro normal, se ha querido también estudiar el diámetro normal de aquellos árboles pertenecientes al cálculo del área

basimétrica, 61. (Diámetro de AB en Tabla 2). Se observa cómo en este caso, el test demuestra que el modelo de regresión lineal simple es aceptado.

Finalmente para poder estudiar la normalidad de los residuos, se ha realizado el test de normalidad de *Kolmogorov-Smirnov*. Como era de esperar, todos los modelos son normales a excepción del Diámetro Normal.

A continuación se interpreta los valores obtenidos en la Tabla 3 por separado.

– *Altura*

La regresión lineal simple para esta variable es muy significativa. El valor de R^2 indica que la recta goza de un buen ajuste (70,54%).

El estimador del parámetro muestra que comparando LiDAR (variable dependiente) con las medidas tomadas en campo (Variable independiente), La variable independiente mide aproximadamente 0,74 m por debajo de las medidas obtenidas a través de las nubes de puntos creadas mediante LiDAR terrestre. Al ser la pendiente ligeramente mayor de 1, dicha diferencia tiende a unificarse cuanto mayor sean las alturas.

El test es no significativo, corrobora la fiabilidad de la correspondencia mostrada entre ambas medidas, y los valores siguen una distribución normal, como su puede también observar en la Gráfica 1 y 2.

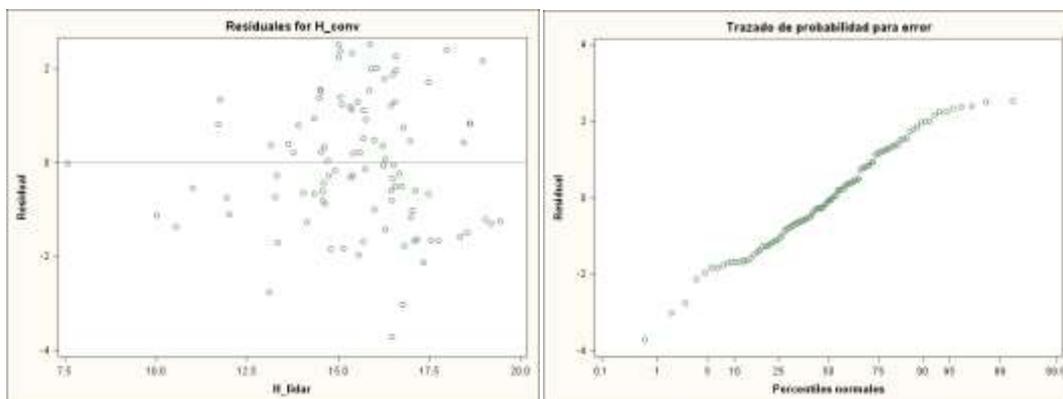


Gráfico 1. El gráfico de la derecha representa la distribución de los valores residuales y el gráfico de la izquierda la distribución normal de dichos residuos para la altura de los árboles.

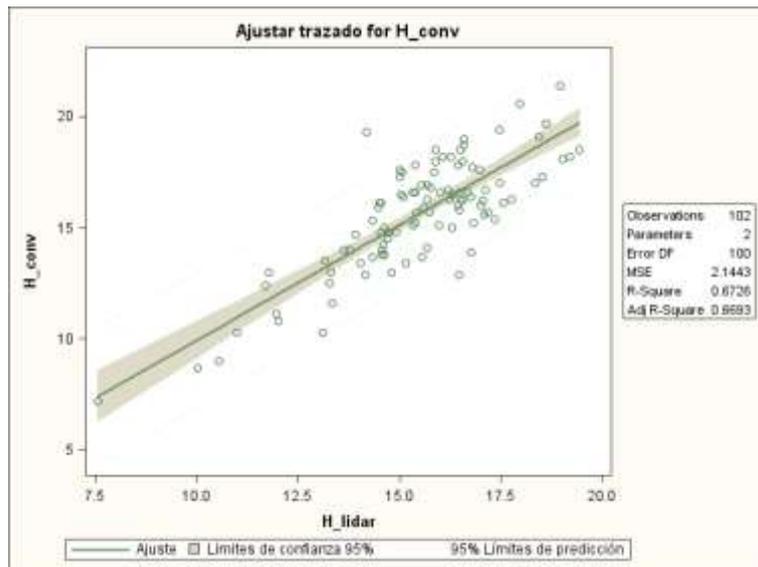


Gráfico 2. Distribución de los residuos para la altura de los árboles, comparando las medidas realizadas mediante hipsómetro con LiDAR terrestre.

– *Diámetro*

En este caso, el estimador del parámetro indica que las medidas realizadas mediante forcípula son de promedio 5,22 cm mayores a las realizadas a través de LiDAR. La pendiente es menor a 1, por lo tanto a mayores diámetros, la diferencia tiende a atenuarse más.

A pesar de que la regresión lineal goza de un buen ajuste ($R^2 = 95,44\%$) el test indica que la comparación de datos no se corresponde ni siguen una distribución normal, contrario a lo que podría parecer si observamos las gráficas 3 y 4.

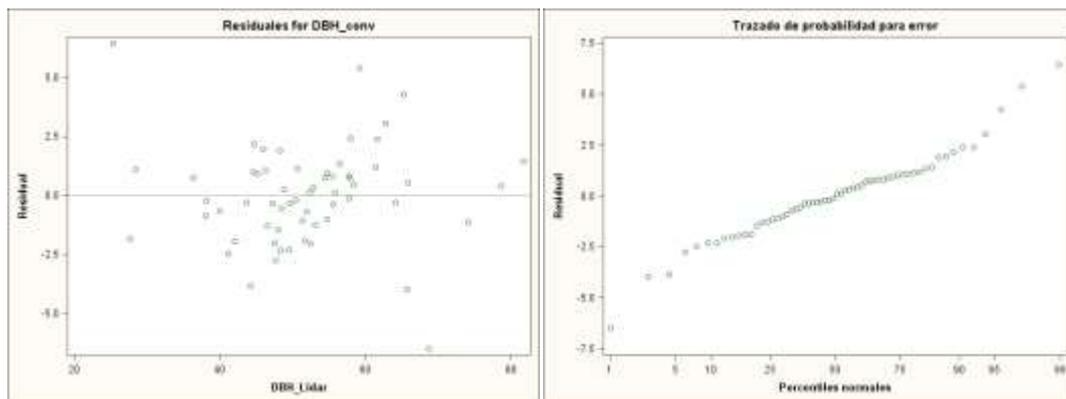


Gráfico 3. Gráfico de distribución aleatoria de los residuos (izquierda). Trazado de probabilidad de error (derecha) para el diámetro normal

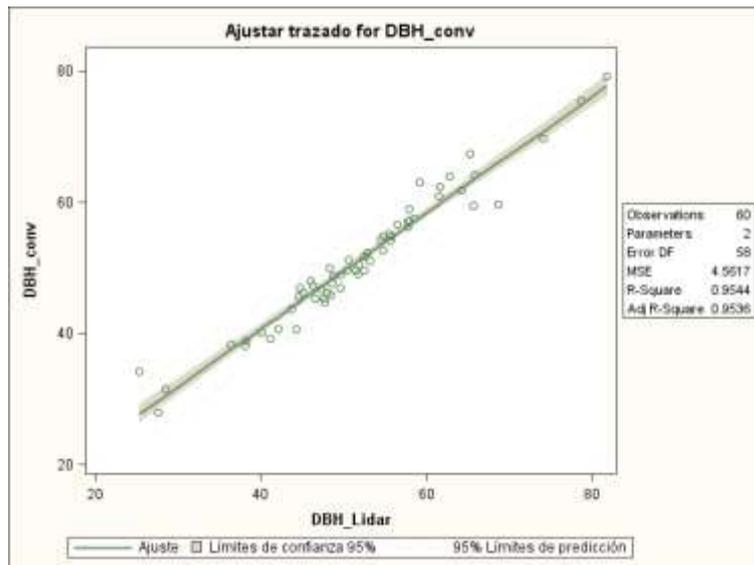


Gráfico 4. Distribución de los residuos de los datos de diámetro normal. En el eje de abscisas las medidas obtenidas a través de LiDAR y en el eje de ordenadas las medidas realizadas mediante forcípula.

– *Diámetro de Área Basimétrica*

El estudio realizado sobre los árboles contenidos en el cálculo del área basimétrica muestra que la variable independiente subestima la variable dependiente en gran medida (272,17 cm), dicha diferencia se atenúa más a mayores diámetros aunque de forma muy paulatina ya que la pendiente es próxima a 1 (0,9). Sin embargo el test indica que la correspondencia entre ambas variables es buena y los datos son normales, hecho que también se observa en las gráficas 5 y 6.

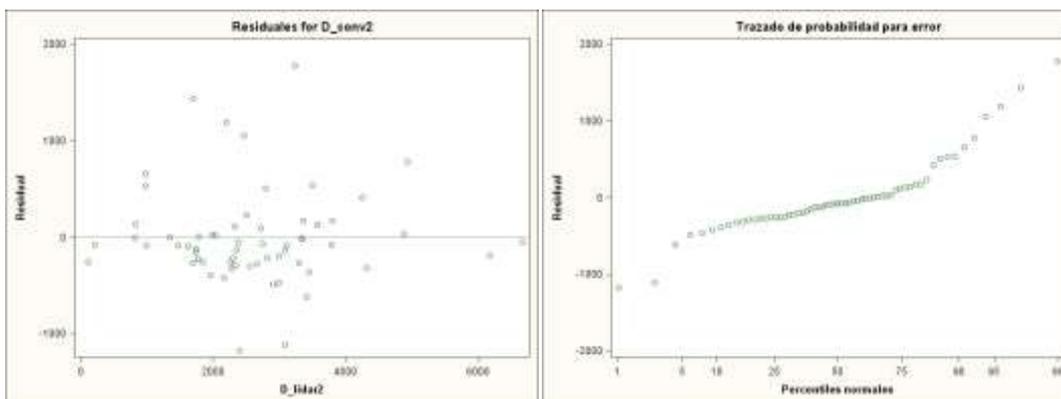


Gráfico 5. Gráfico de distribución aleatoria de los residuos (izquierda). Trazado de probabilidad de error (derecha) para los diámetros pertenecientes al cálculo del área basimétrica.

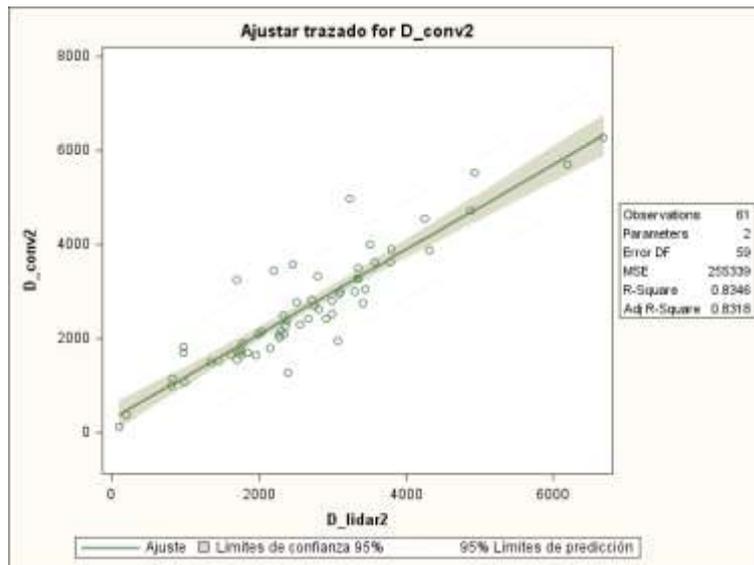


Gráfico 6. Distribución de los residuos de los datos de diámetro normal contenidos en el estudio del área basimétrica. En el eje de abscisas las medidas obtenidas a través de LiDAR y en el eje de ordenadas las medidas realizadas mediante forcípula.

– *Anchura de copa*

El test indica que las medidas obtenidas a través de LiDAR son significativamente diferentes a las realizadas en campo mediante la cinta métrica. Sin embargo el estudio de dichas variables de forma individual muestra que por separado cumplen las hipótesis planteadas.

Las medidas realizadas en campo resultan ser de promedio 0,33 m menores a las realizadas mediante LiDAR, diferencia que se en aumento a medida que la copa de los árboles es mayor pues la pendiente de la regresión es de 0,89.

Los gráficos 7 y 8 muestran la distribución normal de los datos.

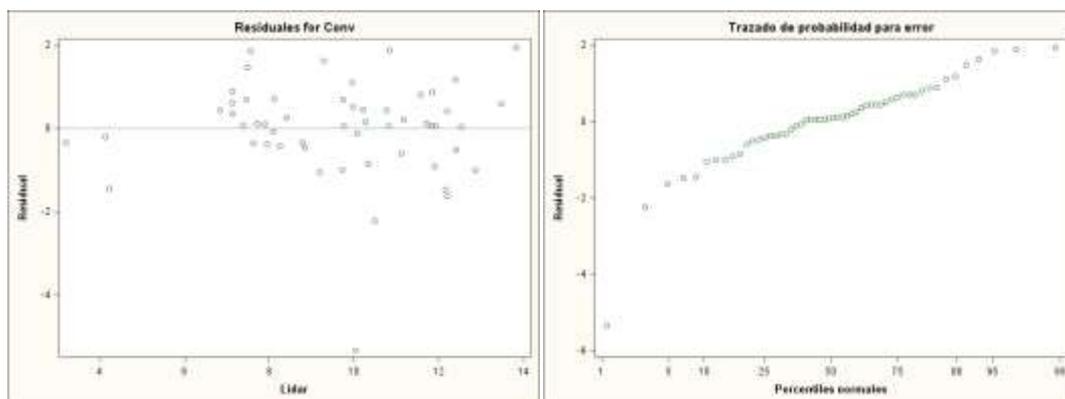


Gráfico 7. Gráfico de distribución aleatoria de los residuos (izquierda). Trazado de probabilidad de error (derecha) para la anchura de copa.

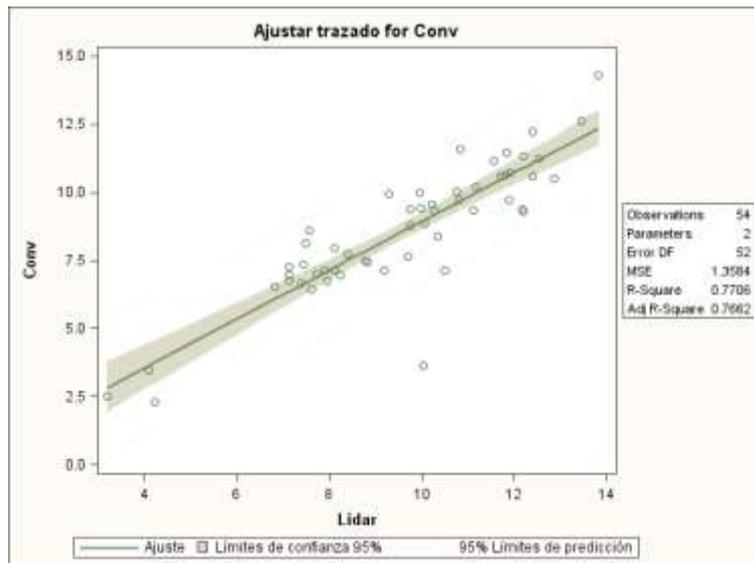


Gráfico 8. Distribución de los residuos para la anchura de copa. En el eje de abscisas las medidas realizadas de LiDAR y en el de ordenadas las medidas obtenidas mediante cinta métrica.

– *Altura copa*

Para esta variable, el R2 es del 52,75%. Por el ajuste debe ser mejorado para poder obtener datos más fiables. Aún así el test indica que las medidas realizadas en campo se corresponden a las realizadas a través de LiDAR terrestre.

El estimador del parámetro muestra que las medidas convencionales son de media 1,54 m mayores a las realizadas en gabinete, y la diferencia se acentúa a medida que la altura de copa es mayor (Pendiente = 0,8)

Los gráficos 9 y 10 indican la distribución normal de los datos.

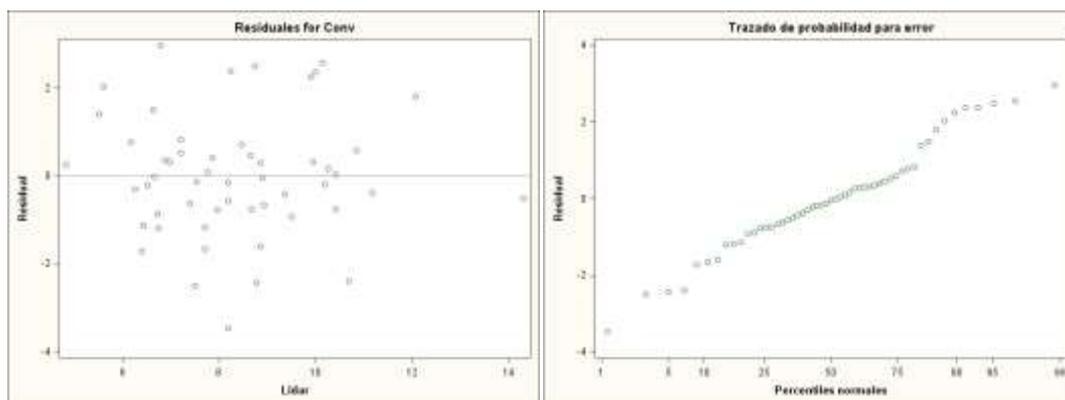


Gráfico 9. Gráfico de distribución aleatoria de los residuos (izquierda). Trazado de probabilidad de error (derecha) para la altura de copa.

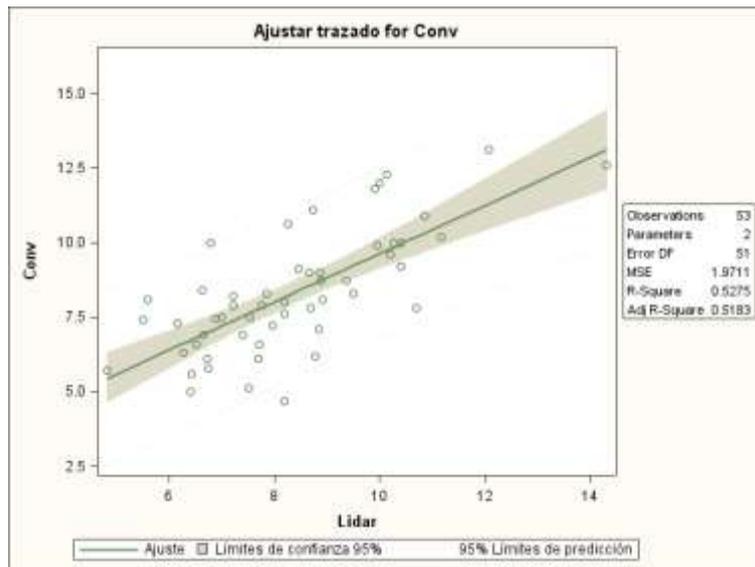


Gráfico 10. Distribución de los residuos de la altura de copa. En el eje de abscisas las medidas obtenidas mediante la nube de puntos de LiDAR y en el eje de ordenadas la medida a través de hipsómetro Vertex III.

– *Área basimétrica*

Para esta variable la regresión lineal goza de un ajuste con un $R^2 = 97,76\%$, por lo tanto los resultados son muy fiables.

Los estimadores del parámetro muestran que la forma convencional mide de promedio $0,62 \text{ m}^2$ menos que los valores obtenidos a través del LiDAR terrestre. Esta diferencia es constante pues la pendiente obtenida es 1.

El test también indica la buena correlación de los datos y los gráficos 11 y 12 la distribución normal de los errores.

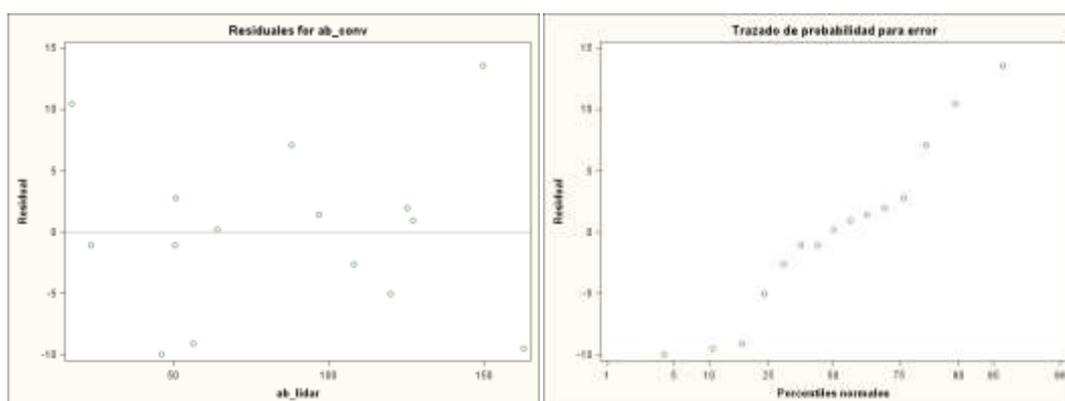


Gráfico 11. Gráfico de distribución aleatoria de los residuos (izquierda). Trazado de probabilidad de error (derecha) para el área basimétrica.

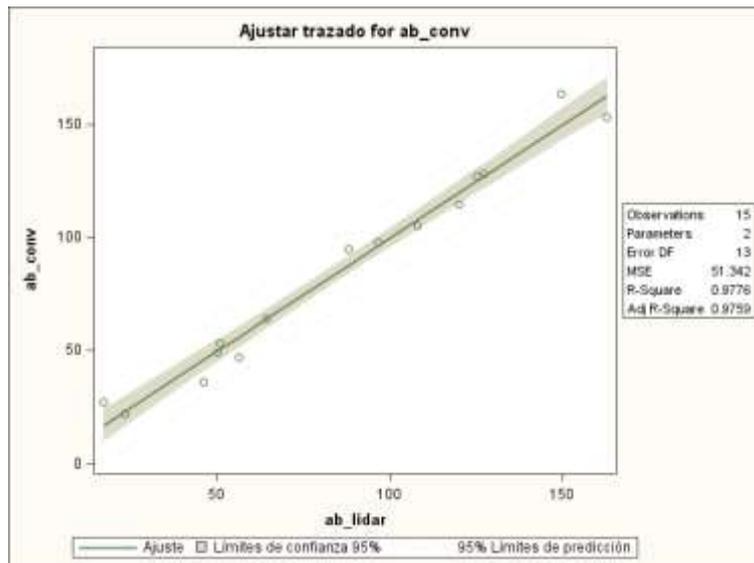


Gráfico 12. Distribución de los residuos del área basimétrica. En el eje de abscisas representa las medidas a través de LiDAR, y en el eje de ordenadas a través de forcípula.

– *Altura fotogramétrica*

Para la fotogrametría el ajuste de la regresión tiene un valor bajo, $R^2 = 57,44\%$.

El análisis indica que de promedio, a través de la fotogrametría mide 0,56 m por debajo de la forma convencional. Sin embargo, a medida que la altura es mayor esta diferencia tiende a unificarse pues la pendiente es de 1,0248.

A pesar de que el estudio muestra que ambas variables cumplen la hipótesis de forma separada (La variable independiente significativamente distinta de 0, y la variable dependiente no significativamente diferente a 1), el test indica que ambas variables no se correlacionan.

Los gráficos 13 y 14 muestran la distribución normal de los datos.

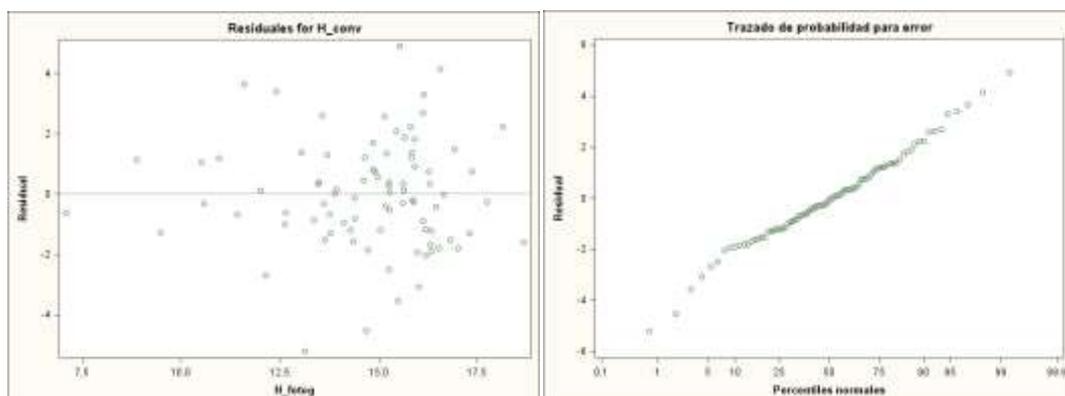


Gráfico 13. Gráfico de distribución aleatoria de los residuos (izquierda). Trazado de probabilidad de error (derecha) para la altura de árboles comparando los resultados obtenidos mediante hipsómetro con los obtenidos a través de la nube de puntos creada a partir de las fotografías aéreas tomadas con el RPAS.

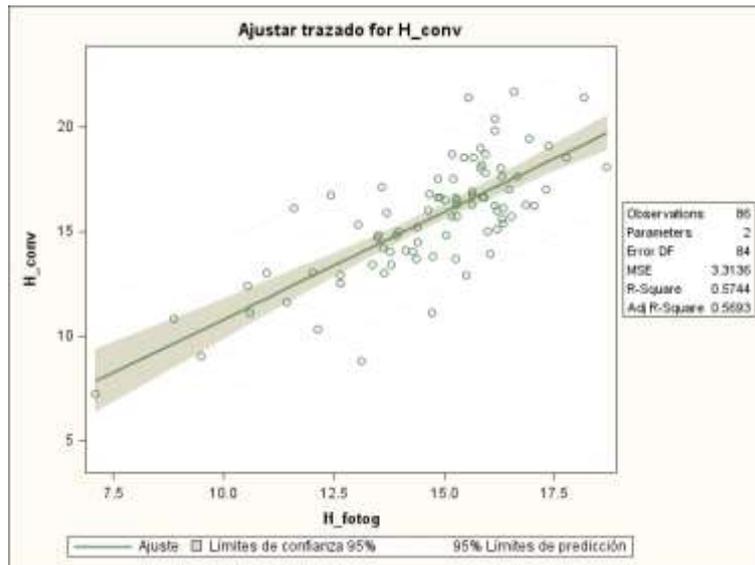


Gráfico 14. Distribución de los residuos de la altura de árboles. En el eje de abscisas las medidas de alturas obtenidas a través de la nube de puntos creada por fotogrametría y en el eje de ordenadas las medidas tomadas a través de hipsómetro Vertex III.

4. DISCUSION

Se ha considera que los resultados obtenidos son suficientemente significativos, a pesar de que sólo se hayan realizado el estudio comparativo con tres de las siete parcelas medidas. El análisis estadístico se ha realizado sobre el conjunto total de los árboles que componen dichas parcelas y no se ha hecho distinción según la silvicultura aplicada en cada uno de ellos. Aun así, la obtención de datos y resultados parece sí verse afectada por la intensidad de corta que presenta cada parcela, siendo más sencilla en la parcela número siete donde la intensidad de corta aplicada en relación al área basimétrica es del 50%. Por el contrario, las número diez, donde dicha intensidad de corta es del 0%, es la parcela en que más pérdida y dificultad de obtención de datos se ha producido.

En general, El LiDAR terrestre demuestra ser un gran instrumento de trabajo para la evaluación métrica del bosque (HOPKINSON ET AL., 2004), representa en gran detalle la morfología de los árboles, lo cual lo hace susceptible de poder ser utilizado como un buen instrumento para la modelización de crecimiento de los árboles (MOSKAL ET AL, 2009), pero es necesario trabajar para mejorar y desarrollar técnicas de identificación automática, así como extracción de datos (HOPKINSON ET AL., 2004) ya que, mientras la adquisición de datos en campo de nubes de puntos 3D LiDAR se realiza de forma rápida, en apenas minutos, luego el procesado de datos toma bastante más tiempo (XU ET AL., 2013) se hace necesario el desarrollo de algoritmos específicos que hagan posible la eliminación de forma automática y sencilla del volumen excesivo de los datos que LiDAR es capaz de recolectar, en ocasiones de escasa o nula utilidad que ralentizan la obtención de resultados.

El nivel de detalle que se puede obtener a partir de los datos escaneados depende de la cantidad y ubicación de los escaneos tomados dentro de la parcela, así como la resolución de escaneo (WATT, 2007). La reciente aplicación de estas tecnologías en el ámbito forestal hace que los métodos de muestreo sean aún poco eficientes debido a la falta de experiencia, Palenzuela et al. (2011) considera que en zonas a levantar muy poco inclinadas, como la superficie del presente estudio, conviene realizar varios puntos de escaneo para evitar así posibles ocultamientos de la zona. A pesar de esto, se considera que las tomas realizadas en cada una de las parcelas de este trabajo, 25, deberán reducirse en sucesivos estudios para bosques de características similares para aumentar así la efectividad de dicha tecnología.

En cuanto a la calidad de la medida del TLS se distinguen varios conceptos como son la exactitud, la precisión y la resolución (IAVARONE 2002; LUÍS 2010). El error cometido en la medida se corrige según diversas aproximaciones (BOEHLER ET AL. 2003; HUISING Y GOMES 1998; LICHTI 2004, 2007; LICHTI ET AL. 2005) sin bien, es difícil encontrar una que se ajuste a todas las condiciones de cada zona de trabajo (STAIGER 2005). Así, el error global derivado del conjunto puede ajustarse al rango entre los 5 y 200 cm (HUISING Y GOMES 1998). Hecho que se corrobora en el presente estudio, donde se estima inferior a 3mm en el dato individual (cada punto escaneado), 3cm en la topografía con estación total, y 10cm en la georreferencia.

La cantidad de información útil contenida en la exploración también disminuye cuando el árbol presenta una densidad alta de follaje o de ramificación, así como cuando la densidad de árboles existentes en la parcela de estudio es alta, influye en el nivel de información que se puede estimar a partir de los datos láser (WATT, 2007). Cuanto más denso es el follaje, el tronco es menos visible, al igual que el sotobosque (pastos altos, plántulas y arbustos). Por otro lado, cuanto menor espaciamiento haya entre individuos, más complicada también es su individualización. Este hecho, se ha podido corroborar en la parcela 7 y 10, las cuales presentan las dos características de

densidad extremas. En la parcela 7 donde la densidad de árboles es baja y los árboles se encuentran espaciados unos de otros, la individualización de los individuos ha resultado ser más sencilla que en la parcela 10, donde hay mayor densidad de árboles y se encuentran muy próximos unos a otros, produciéndose entrecruzamiento copas, lo cual ha supuesto errores de medición por pérdida o exceso de datos.

Sin embargo, en cuanto a la caracterización de la masa forestal, de la misma manera en que se observó en el estudio realizado por Hopkinson (2004), se ha visto que el LiDAR terrestre es capaz de representar de forma precisa información sobre la ubicación del tronco y la altura del árbol. Esto se traduce en un gran ahorro de tiempo a la hora de georreferenciar los árboles. Mientras que con la estación total es necesario realizar la georreferenciación árbol por árbol, el TLS permite una vez alineadas los diferentes puntos de escaneo, obtener automáticamente todas las nubes de puntos georreferenciadas, es decir, todos los árboles a la vez. Además, a través de la Imagen 40 se puede observar cómo en el trabajo de posicionamiento de árboles en campo puede ocurrir que se supriman o incluyan árboles de forma errónea. El uso de LiDAR elimina dicho error, por tanto la caracterización de masa es más fiable.

El principal beneficio de escaneo láser es la capacidad de proporcionar un registro espacial cuantitativo de la estructura del bosque en tres dimensiones. Además de permitir el estudio de forma individual de sus componentes, tales como tronco o copa. (WATT, 2007). Con las características de ser intacto, preciso y eficiente, el LiDAR terrestre es una buena herramienta para la observación y punto de referencia para la caracterización precisa de la arquitectura vegetal, ayudando así a mejorar la eficiencia de supervisión y de gestión forestal (XU ET AL, 2013). Permite poder tener un registro permanente, una copia de seguridad de los árboles.

Coincidiendo con el estudio realizado por Hopkinson (2004) sobre *Pinus resinosa* Ait. y *Acer saccharum* Marsh. Las medidas realizadas a través del TLS tienden a estar ligeramente por debajo de las realizadas en campo.

Algunos errores de medición en la altura (tanto LiDAR, como mediante hipsómetro) se produce como consecuencia de la densidad de las copas que, en ocasiones, obstruyen la vista tanto superior como inferior de los árboles (HOPKINSON ET AL., 2004). Se considera que la medición de alturas en parcelas donde la densidad no es elevada, como en este caso, que la medición de alturas es más exacta y objetiva a través de las nubes de puntos LiDAR ya que el software permite individualizar el árbol por completo, a diferencia de las medidas tomadas en campo que resultan ser medidas parciales pues dependen del operario, las condiciones atmosféricas (sol, lluvia, etc.) además de la imposibilidad de poder aislar el árbol en aquellas ocasiones que la densidad de la masa dificulta las medidas obstaculizando la visualización del árbol completo.

En los estudios realizados por Hopkinson (2004) y Watt (2007), las especies estudiadas fueron *Pinus resinosa* Ait., *Acer saccharum* Marsh y *Picea sitchensis* y *Pinus contorta* respectivamente. Los resultados que obtuvieron a través del LiDAR para el diámetro normal no muestran ninguna tendencia. Sin embargo en el presente estudio se observa que el modelo no cumple dicha correlación. Se considera que existen varios factores causantes de estos resultados. El primero de ellos en ser considerado es la altura a la que se realiza la medida, mientras que en campo la medida a 1,3 m de la base del árbol es de forma aproximada, a través de la nube de puntos esta medida es exacta. Dado que se trata de árboles que han sido resinados, presentan un tronco muy poco uniforme por lo que una pequeña diferencia de altura a la que se mide la sección puede ocasionar grandes variaciones.

Otro problema a considerar son los ángulos desde los que se toman los diferentes escaneos y el efecto sombra de los propios árboles, que hace que alguna información se pierda durante el proceso de escaneo, lo que hace difícil obtener la vista horizontal

360° de un tronco (MOSKAL ET AL., 2009). Por ello los estudios realizados por MOSKAL ET AL, 2009; HOPKINSON ET AL, 2004 han realizado reconstrucción el diámetro normal a partir de un cilindro, ya que las coordenadas del centro y el radio se pueden utilizar para generar la ecuación general (MOSKAL ET AL., 2009), sin embargo la complejidad de dicha reconstrucción ha impedido que se pueda aplicar en este trabajo, debido a la ya comentada limitación de tiempo. Finalmente, la incapacidad del programa Polyworks, como ya comenta Xu et al., 2013, a adaptarse al eje de cada uno de los árboles contenidos en la parcela de la misma manera que se hace en campo, provoca importante pérdida de datos, pues el corte se ha realizado para todos los árboles a 1,3 m sobre el eje z, por lo tanto en árboles excesivamente torcidos se han invalidado sus resultados. el corte no es válido y ha sido necesario eliminarlo del estudio comparativo. La rectitud del árbol es, precisamente, uno de los principales inconvenientes que presenta la especie *Pinus Pinaster*, cuyos fustes tienden a doblarse y curvarse (SIERRA DE GRADO, 1997) (ver imagen 46).

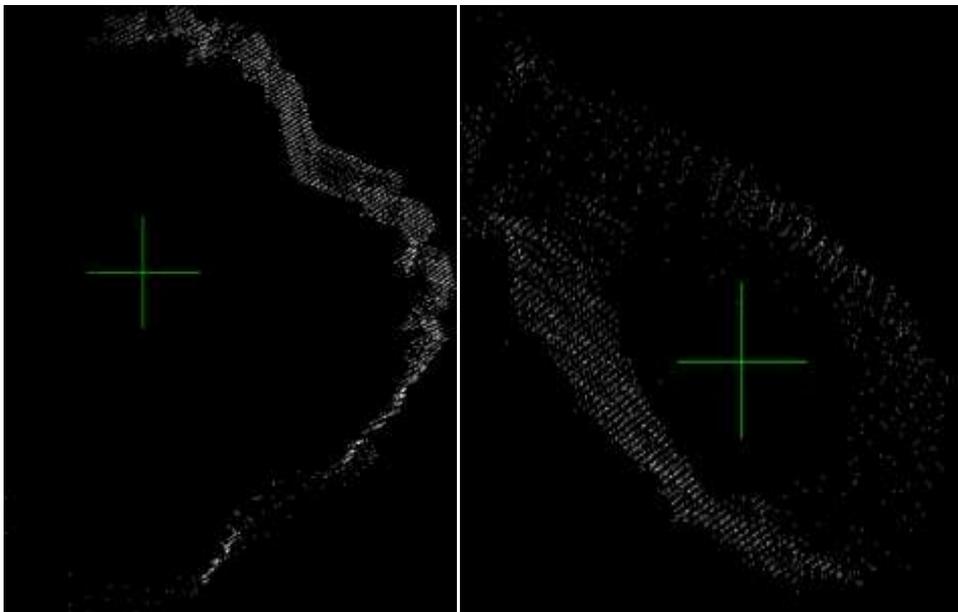


Imagen 46. La imagen de la derecha es un ejemplo de pérdida de datos debido a la a las obstrucciones de visibilidad que existen en los bosques o que el ángulo desde el que se tomo el escaneo no fue el adecuado. La imagen de la derecha muestra los problemas del programa *Polyworks*, pues a pesar de que el tronco se ha escaneado completamente, el corte a 1,3 no sigue el eje del árbol, por tanto es imposible compararlo con su diámetro normal medido en campo.

Por todo el análisis estadístico de la comparación de datos LIDAR y forcípula es el esperado. Es necesario realizar sucesivos estudios donde se desarrolle un algoritmo capaz de realizar cortes perpendiculares al eje del tronco y poder así realizar la medida del diámetro de la misma manera que se realizan en campo.

El hecho de que el modelo muestre una buena correlación si es aplicada sobre el diámetro de aquellos árboles pertenecientes al estudio del área basimétrica puede ser debido a la casualidad de una buena rectitud de sus troncos.

El estudio realizado por Xu et al, 2013 sobre las diferentes especies de árboles que conforman el parque nacional de Jiufeng (China). Indica la facilidad de la medida de copas con respecto a la altura total del árbol en árboles frondosos medidos en invierno. Sin embargo en este estudio, se considera que para coníferas esa afirmación

no es válida pues por un lado no es posible realizar la toma de datos durante la caída de hojas como recomienda dicho estudio y segundo la superposición de copas no ha permitido en la mayoría de los casos conseguir la extracción completa de cada una de ellas (Ver Imagen 47).

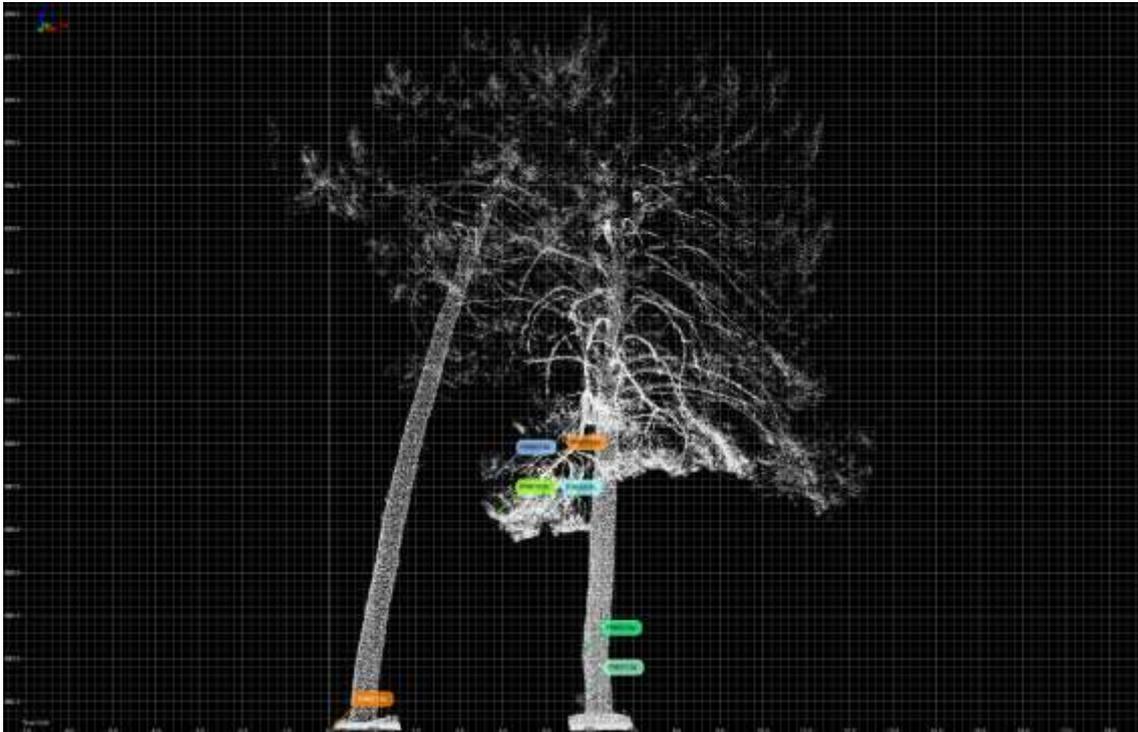


Imagen 47. La superposición de copas ha dificultado la individualización de los árboles.

A pesar de que es necesario realizar más estudios, se considera que la no correlación entre las mediciones realizadas en campo con respecto a las realizadas con LiDAR es debido a la gran precisión de medida de éste último con respecto a la toma de datos llevada a cabo en campo. La ecuación obtenida a través del modelo lineal indica que la diferencia de resultados entre una técnica y otra aumenta a medida que la anchura de copa es mayor. Es de suponer que a mayor anchura de copa, mayor altura y con ello mayor parcialidad en la medida pues existe menos perspectiva. La tecnología LiDAR es capaz de solventar este problema al permitir mover la nube de puntos en el espacio, consiguiendo así medidas más exactas e imparciales.

Otros problemas a considerar son los reflexionados en el estudio realizado por Xu et al. (2013), que afectan tanto a las medidas convencionales como al TLS es (1) el movimiento de la copa de los árboles por el viento u otros factores en el proceso de medición. (2) Como ya se ha comentado, la densidad, como la superposición de copas supone una dificultado en ambos casos.

Para la altura de copas, se considera que LiDAR no es capaz de generar la automatización de valores buscada pues la monocromía con la que han sido tomados los datos dificulta la distinción de ramas vivas y muertas. Por lo tanto, al igual que en campo estas medidas son parciales. Aun así LiDAR presenta la ventaja de poder realizar varias medidas sobre el mismo árbol que garanticen un valor exacto.

La nube de puntos creada a través de LiDAR y su gestión a través del programa *Polyworks* presenta una gran ventaja en el cálculo del área basimétrica, debido a la gran exactitud con que se puede definir los límites de las parcelas circulares para su

cálculo ya que es posible obtener una gran perspectiva de visión, lo cual en campo no es posible.

En cuanto a la fotogrametría, existen varios motivos a considerar en la interpretación del análisis estadístico frente a los convencionales.

La imagen 48 representa los datos del vuelo de las distintas fotografías que se han llevado desde el RPAS, mostrando su localización. A su vez estas localizaciones vienen determinadas por un color el cual nos indica la calidad de la representación en 3D a partir de las imágenes. A mayor superposición, mayor calidad. En el análisis de los datos ha habido muchos árboles que el software no ha sido capaz de reconstruir en 3D, obteniendo 87 de los 102 árboles totales que conforman el estudio. Esta pérdida de datos coincide con los bordes donde la superposición de imágenes es menor. Por lo tanto se considera conveniente que en futuros vuelos el diseño de los mimos procure mayor repetibilidad de los trazos por los que realizarán las fotografías.

El Anejo 3 muestra el informe del proceso de vuelo de forma más detallada.

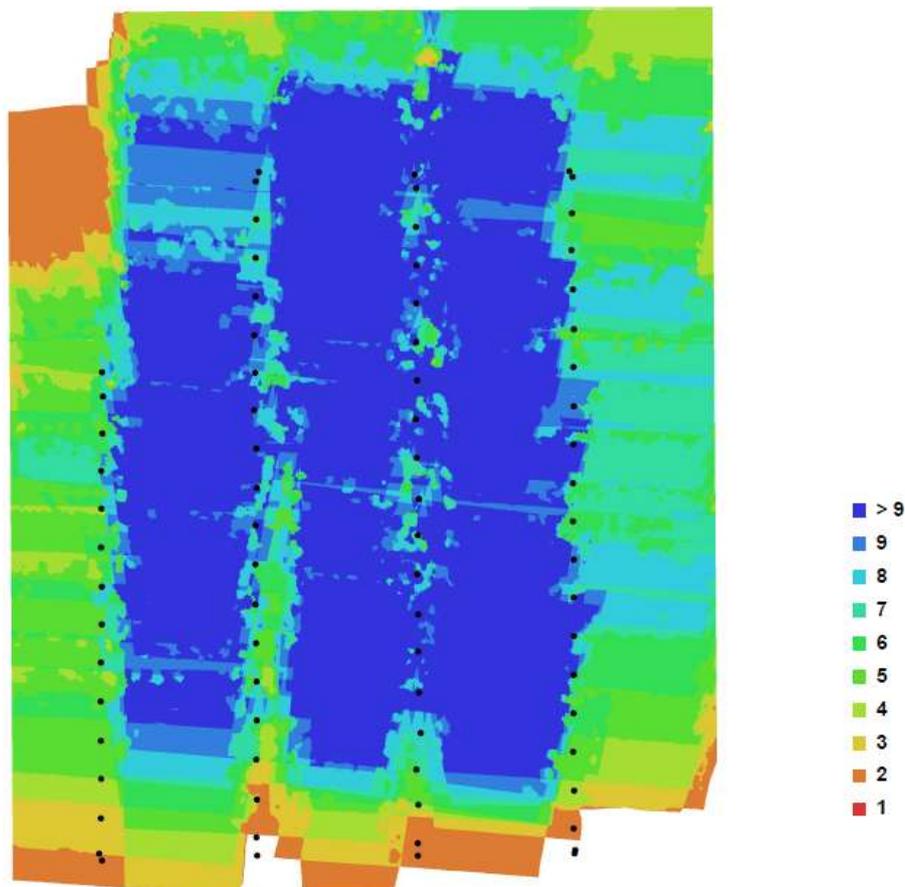


Imagen 48. Datos del vuelo. Se muestra las localizaciones desde donde se tomaron las fotografías. Los distintos colores indican la cantidad de superposiciones realizadas. Así los colores naranjas indican zonas donde sólo se obtuvieron dos superposición de fotografías y el color azul intenso aquella donde se ha producido la superposición con más de nueve fotografías.

Las fotografías aéreas pueden ser tomadas de forma oblicua o vertical. Aún así, se debe tener en cuenta, que todas las fotografías aéreas verticales están ligeramente inclinadas, debido a los movimientos del RPAS durante el vuelo. Esta inclinación, sin embargo, no debe exceder de 3-4° (VAN LAAR Y AKÇA, 2007). En este estudio, la inclinación con la que se tomaron las fotografías fue de 10-15° debido a un problema mecánico del soporte de cámara que solo pudo ser determinado a posteriori, por tanto sería conveniente realizar nuevamente el vuelo y el consiguiente análisis comparativo para ver si el resultado cambia o no.

En la medición de la altura a través de la fotogrametría, las fotografías tomadas en una escala de 1:5000 y 1:15000, tienen un error medio que varía entre 0,5 y 1,0 m (AKÇA, 1973). Por otro lado Hildebrandt (1996) obtuvo un promedio de error de aproximadamente 1 m entre la misma escala considerada. En este trabajo, debido a que se ha utilizado una escala de imagen mucho mayor, solo posible gracias al uso de un vehículo no tripulado, podemos afirmar que el error en la determinación de la coordenada Z es menor de 10cm.

A la hora de determinar la altura total del árbol, las masas viejas de coníferas presentan dos dificultades importantes. El primero es el ápice terminal, pues no suele ser tan reconocible como lo es en masas de frondosas de la misma edad, lo cual da lugar a una cierta parcialidad en las mediciones según el operador que realice la operación. El segundo obstáculo se presenta en la identificación de la base del árbol, ya que muchas veces no es posible representarla debido al obstáculo de visualización de otros árboles o de su propia copa. En este caso se utiliza el punto del suelo más próximo a la base, con lo que la determinación de la base es también parcial (VAN LAAR Y AKÇA, 2007).

Otro problema presente es la resolución de las fotografías aéreas. Una limitada resolución tiende a producir mediciones sesgadas de forma negativa (VAN LAAR Y AKÇA, 2007), como se observa en el análisis estadístico, el cual indica que las medidas realizadas a través de la fotogrametría se subestiman en 0,62 m con respecto a las medidas realizadas con hipsómetro (Ver Tabla 2). Sin embargo, en este estudio se ha experimentado que en coníferas, una resolución excesiva también dificulta la representación en 3D de la masa puesto que las acículas se mueven con cierta facilidad por lo que resulta complicado localizar la copa en la misma posición en al menos dos fotografías, hecho necesario para poder realizar dicha reconstrucción en 3D.

A pesar de que esta tecnología también permite obtener la posición de los árboles de forma georreferenciada, la falta de representación de los árboles completos hace que se prefiera la tecnología LiDAR para esta tarea.

5. CONCLUSION

El uso de tecnología LiDAR terrestre y fotogrametría en el ámbito forestal en España es muy reciente por lo que es necesario realizar más experiencias para poder conseguir resultados concluyentes.

La experiencia obtenida a lo largo de este estudio, permite demostrar que estas nuevas tecnologías son métodos no agresivos para la masa con capacidad potencial de ofrecer un gran volumen de información dendrométrica y dasométrica de los bosques.

La obtención de las nubes de puntos es relativamente rápida considerando la gran cantidad de información que con ellos se adquiere. Sin embargo se hace necesario mejorar el método de muestreo, que para este trabajo se considera poco eficiente debido al gran volumen de datos obtenidos de escasa o nula utilidad que han dificultado y retrasado la obtención de resultados. Una vez en gabinete, el proceso de identificación e individualización de los árboles ha sido un proceso extremadamente lento, por lo que se considera preciso seguir realizando estudios que permitan el desarrollo de algoritmos capaces de automatizar dicho proceso.

Estos instrumentos, presentan, hoy por hoy una desventaja, pues son muy caros al igual que los componentes informáticos de necesitan para poder procesar la información capturada en campo (software y ordenador potente).

Con este estudio, se ha demostrado la capacidad del TLS y fotogrametría terrestre de representar con mucha precisión los árboles en 3D lo que nos permite disponer de una gran cantidad de datos morfológicos automáticamente. No así con la fotogrametría realizada a través del RPAS, a través del cual sólo se ha podido representar las copas de los árboles y el suelo.

Se puede decir que el uso de esta nueva tecnología es tanto más apropiado cuanto menos densidad de árboles. Los resultados obtenidos nos indican que de forma general esta tecnología nos permite obtener la misma información obtenida en campo, llegando a ser incluso más precisa. Para el estudio del diámetro, es conveniente realizar más experiencias con árboles de fuste más recto, al igual que desarrollar algoritmos capaces de ajustarse al eje del tronco.

Estas nuevas técnicas de medición tiene la capacidad potencial de ser de gran utilidad en parcelas permanentes donde se suelen realizar mediciones de forma más o menos periódica y poder desarrollar así modelos de predicción de crecimiento de los bosques. Sin embargo, hay que tener en cuenta que no es trivial el asociar a un dato 3d elemental (un punto de la nube de puntos) un edificador único que permita reconocerlo en distintas mediciones a lo largo de la vida (el crecimiento) del espécimen. Por ej. Si el punto de inserción de una rama en el tronco cambia de posición al crecer y engrosar, no será fácil que un algoritmo informe de cuales han sido estos movimientos de forma automática si no es bajo condiciones muy controladas en la medición. (Frecuencia de las mediciones, parámetros de medición, georreferenciado, etc).

6. BIBLIOGRAFIA

- BALTSAVIAS, Emmanuel P. A Comparison between Photogrammetry and Laser Scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1999, vol. 54, no. 2, pp. 83-94.
- BÉLAND, Martin, et al. On Seeing the Wood from the Leaves and the Role of Voxel Size in Determining Leaf Area Distribution of Forests with Terrestrial LiDAR. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1/15, 2014, vol. 184, no. 0, pp. 82-97. ISSN 0168-1923.
- CLARK, Matthew L.; CLARK, David B. and ROBERTS, Dar A. Small-Footprint Lidar Estimation of Sub-Canopy Elevation and Tree Height in a Tropical Rain Forest Landscape. *Remote Sensing of Environment*, 5/15, 2004, vol. 91, no. 1, pp. 68-89. ISSN 0034-4257.
- CÔTÉ, Jean-François; FOURNIER, Richard A. and EGLI, Richard. An Architectural Model of Trees to Estimate Forest Structural Attributes using Terrestrial LiDAR. *Environmental Modelling & Software*, 6, 2011, vol. 26, no. 6, pp. 761-777. ISSN 1364-8152.
- DE GRADO, R. Sierra; and FERNÁNDEZ, V. Pando. Nuevo Enfoque Para La Mejora De La Rectitud Del Fuste En Pinus Pinaster Ait. *Cuadernos De La SECF*, 2008, no. 24.
- DE GRADO, ROSARIO SIERRA. Observaciones Sobre La Rectitud En Pinus Pinaster Ait.
- DORADO, Fernando Castedo; ARANDA, Ulises Diéguez and GONZÁLEZ, Juan Gabriel Alvarez. Funciones De Crecimiento En Área Basimétrica Para Masas De Pinus Sylvestris L. Procedentes De Repoblación En Galicia. *Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales*, 2005, vol. 14, no. 2, pp. 253-266.
- GOERNDT, Michael E.; MONLEON, Vincente J. and TEMESGEN, Hailemariam. Relating Forest Attributes with Area- and Tree-Based Light Detection and Ranging Metrics for Western Oregon. *Western Journal of Applied Forestry*, 2010, vol. 25, no. 3, pp. 105-111.
- HANCOCK, Steven, et al. Characterising Forest Gap Fraction with Terrestrial Lidar and Photography: An Examination of Relative Limitations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 6/1, 2014, vol. 189–190, no. 0, pp. 105-114. ISSN 0168-1923.
- HENNING, Jason G.; and RADTKE, Philip J. Ground-Based Laser Imaging for Assessing Three-Dimensional Forest Canopy Structure. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 2006, vol. 72, no. 12, pp. 1349-1358.
- HOPKINSON, Chris, et al. Assessing Forest Metrics with a Ground-Based Scanning Lidar. *Canadian Journal of Forest Research*, 2004, vol. 34, no. 3, pp. 573-583.
- HUDAK, Andrew T., et al. Nearest Neighbor Imputation of Species-Level, Plot-Scale Forest Structure Attributes from LiDAR Data. *Remote Sensing of Environment*, 5/15, 2008, vol. 112, no. 5, pp. 2232-2245. ISSN 0034-4257.

- JONES, Bradley; and NACHTSHEIM, Christopher J. Split-Plot Designs: What, Why, and how. *Journal of Quality Technology*, 2009, vol. 41, no. 4, pp. 340-361.
- LA DIVERSIDAD, QUENOSEV. Pinares y Rodenales La Diversidad Que no Se Ve.
- LOVELL, JL, et al. Measuring Tree Stem Diameters using Intensity Profiles from Ground-Based Scanning Lidar from a Fixed Viewpoint. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2011, vol. 66, no. 1, pp. 46-55.
- MOSKAL, L. Monika, et al. Lidar Applications in Precision Forestry. *Proceedings of Silvilaser*, 2009, pp. 154-163.
- PALLEJA, T., et al. Sensitivity of Tree Volume Measurement to Trajectory Errors from a Terrestrial LIDAR Scanner. *Agricultural and Forest Meteorology*, 10/15, 2010, vol. 150, no. 11, pp. 1420-1427. ISSN 0168-1923.
- VAN LAAR, Anthonie; and AKÇA, Alparslan. *Forest Mensuration*. Springer, 2007.
- WATT, Michael S., et al. Modelling Variation in Pinus Radiata Stem Volume and Outerwood Stress-Wave Velocity from LiDAR Metrics. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2013, vol. 43, no. 1, pp. 1-7.
- WATT, Michael S., et al. Use of LiDAR to Estimate Stand Characteristics for Thinning Operations in Young Douglas-Fir Plantations. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2013, vol. 43, no. 1, pp. 1-10.
- WATT, PJ; and DONOGHUE, DNM. Measuring Forest Structure with Terrestrial Laser Scanning. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, vol. 26, no. 7, pp. 1437-1446.
- XU, Weiheng, et al. Comparison of Conventional Measurement and LiDAR-Based Measurement for Crown Structures. *Computers and Electronics in Agriculture*, 2013, vol. 98, pp. 242-251.

CONSULTAS ELECTRÓNICAS

- Cartografía de Cuéllar
<<http://www.igme.es/internet/cartografia/cartografia/magna50.asp?hoja=401>>
(Consulta: 18.05.2014)
- Clima de Mata de Cuéllar: <<http://es.climate-data.org/location/360667/>>
(Consulta: 18.05.2014)

ANEJOS

- 1. Informe GPS**
- 2. Ficha técnica árbol 12, parcela 2.**
- 3. Programa y resultados estadísticos (SAS)**
- 4. Informe del vuelo RPAS.**

ANEJOS

ANEJO 1

Informe GPS

Resumen de procesamiento ISCAR_2

Información del proyecto

Nombre del proyecto: ISCAR_2
 Fecha de creación: 22/11/2013 11:35:37
 Huso horario: 1h 00'
 Sistema de coordenadas: ETRS89_UTM30N (GEOIDE)
 Programa de aplicación: LEICA Geo Office 7.0
 Fecha y hora de inicio: 20/11/2013 10:59:44
 Fecha y hora de término: 20/11/2013 12:59:08
 Puntos ocupados manualmente: 3
 Puntos en movimiento: 2122
 Kernel de procesamiento: PSI-Pro 2.0
 Procesado: 29/11/2013 12:42:37

Parámetros de procesamiento

Parámetros	Selección
Ángulo de elevación:	10°
Tipo de efemérides:	Transmitidas
Tipo de solución:	Automático
Tipo GNSS:	Automático
Frecuencia:	Automático
Fijar ambigüedades hasta:	80 km
Duración mínima para solución flotante (estático):	5' 00"
Intervalo de muestreo:	Usar todas
Modelo troposférico:	Hopfield
Modelo ionosférico:	Automático
Emplear modelo estocástico:	Sí
Dist. mínima:	8 km
Actividad ionosférica:	Automático

Inf. general de línea base

OLME - 0001	Referencia: OLME	Móvil: 0001
Tipo de receptor / N/S:	GRX1200GGPRO / 461906	SR20 / 20872
Tipo de antena / N/S:	AX1202 GG / -	AT501 en bastón / -
Altura de antena:	0.00 m	2.06 m
Coordenadas:		
Latitud:	41° 17' 07.95097" N	41° 22' 27.77510" N
Longitud:	4° 41' 02.07826" W	4° 29' 05.57440" W
Alt Elip.:	828.19 m	800.87 m
Tipo de solución:	Fase: todo fijo	
Tipo GNSS:	GPS	
Frecuencia:	Sólo L1	
Ambigüedad:	Sí	
Intervalo de observación:	20/11/2013 10:59:44 - 20/11/2013 11:41:55	

Duración: 42' 11"

Calidad: Desv. Est. Lat: 0.00 m Desv. Est. Lon: 0.00 m Desv. Est. Alt.: 0.00 m
Q Posic.: 0.00 m Desv. Est. geom.: 0.00 m

Vector de línea base: DLat: 0° 05' 19.82413" DLon: 0° 11' 56.50386" DAlt: -27.32 m
Geométrica: 19366.28 m

DOPs (mín-máx): GDOP: 2.4 - 7.3
PDOP: 2.0 - 5.7 HDOP: 1.2 - 2.2 VDOP: 1.6 - 5.3

Número de satélites usados: GPS: 9
GLONASS: -

OLME - 0005	Referencia: OLME	Móvil: 0005
Tipo de receptor / N/S:	GRX1200GGPRO / 461906	SR20 / 20872
Tipo de antena / N/S:	AX1202 GG / -	AT501 en bastón / -
Altura de antena:	0.00 m	2.06 m

Coordenadas:		
Latitud:	41° 17' 07.95097" N	41° 22' 25.75728" N
Longitud:	4° 41' 02.07826" W	4° 28' 58.68082" W
Alt Elip.:	828.19 m	801.19 m

Tipo de solución: Fase: todo fijo

Tipo GNSS: GPS

Frecuencia: Sólo L1

Ambigüedad: Sí

Intervalo de observación: 20/11/2013 12:35:00 - 20/11/2013 12:58:36

Duración: 23' 36"

Calidad: Desv. Est. Lat: 0.00 m Desv. Est. Lon: 0.00 m Desv. Est. Alt.: 0.00 m
Q Posic.: 0.00 m Desv. Est. geom.: 0.00 m

Vector de línea base: DLat: 0° 05' 17.80631" DLon: 0° 12' 03.39744" DAlt: -26.99 m
Geométrica: 19473.03 m

DOPs (mín-máx): GDOP: 1.8 - 2.1
PDOP: 1.5 - 1.8 HDOP: 0.8 - 1.0 VDOP: 1.3 - 1.5

Número de satélites usados: GPS: 11
GLONASS: -

Información general cinemática

OLME - 0004	Referencia: OLME	Móvil: 0004
Tipo de receptor / N/S:	GRX1200GGPRO / 461906	SR20 / 20872
Tipo de antena / N/S:	AX1202 GG / -	AT501 en bastón / -
Altura de antena:	0.00 m	

Coordenadas de referencia:	
Latitud:	41° 17' 07.95097" N
Longitud:	4° 41' 02.07826" W
Alt Elip.:	828.19 m

Puntos ocupados manualmente: 1

Puntos en movimiento: 2332

Intervalo de observación: 20/11/2013 11:48:43 - 20/11/2013 12:59:08

Duración: 1h 10' 25"

DOPs (mín-máx):	GDOP: 1.7 - 33.7	PDOP: 1.5 - 26.3	HDOP: 0.8 - 12.4	VDOP: 1.3 - 23.2
Número de satélites usados:	GPS: 13	GLONASS: -		

Puntos ocupados manualmente**0004**

Coordenadas:

Latitud:	41° 22' 18.29664" N
Longitud:	4° 29' 10.20887" W
Alt Elip.:	802.25 m

Altura de antena: 2.06 m

Tipo de solución: Fase: todo fijo

Frecuencia: Sólo L1

Ambigüedad: Sí

Intervalo de observación: 20/11/2013 11:48:43 - 20/11/2013 12:19:16

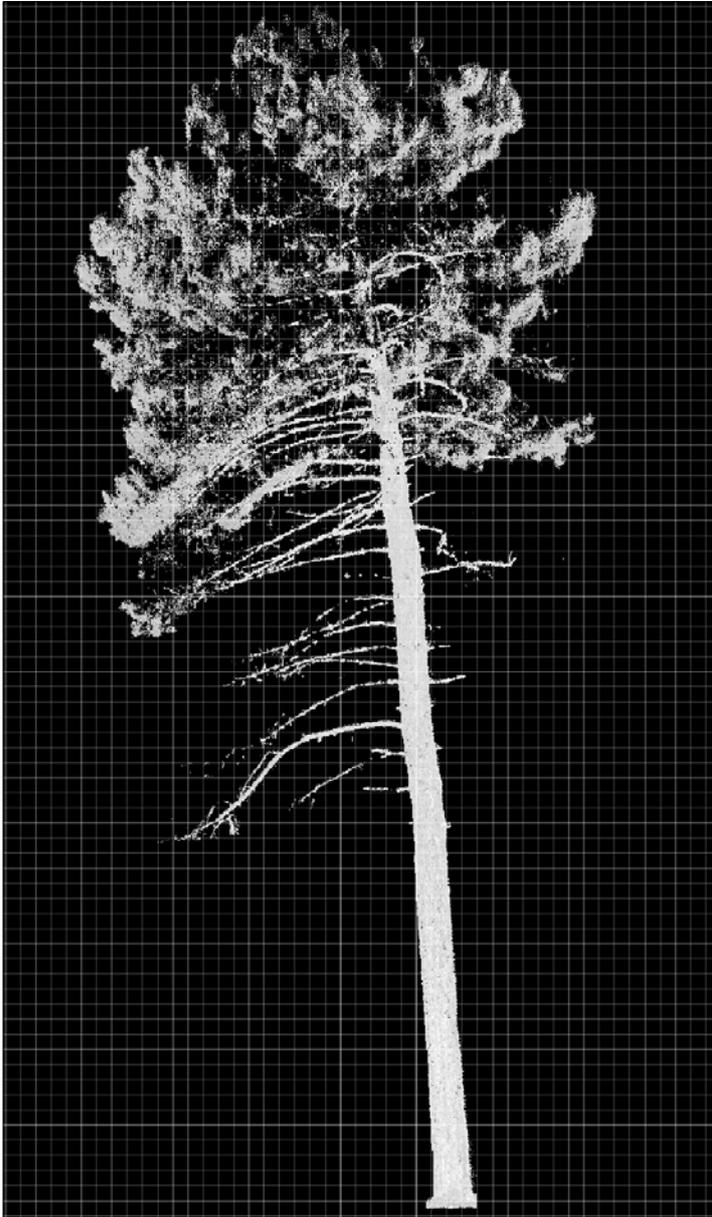
Duración: 30' 33"

ANEJO 2

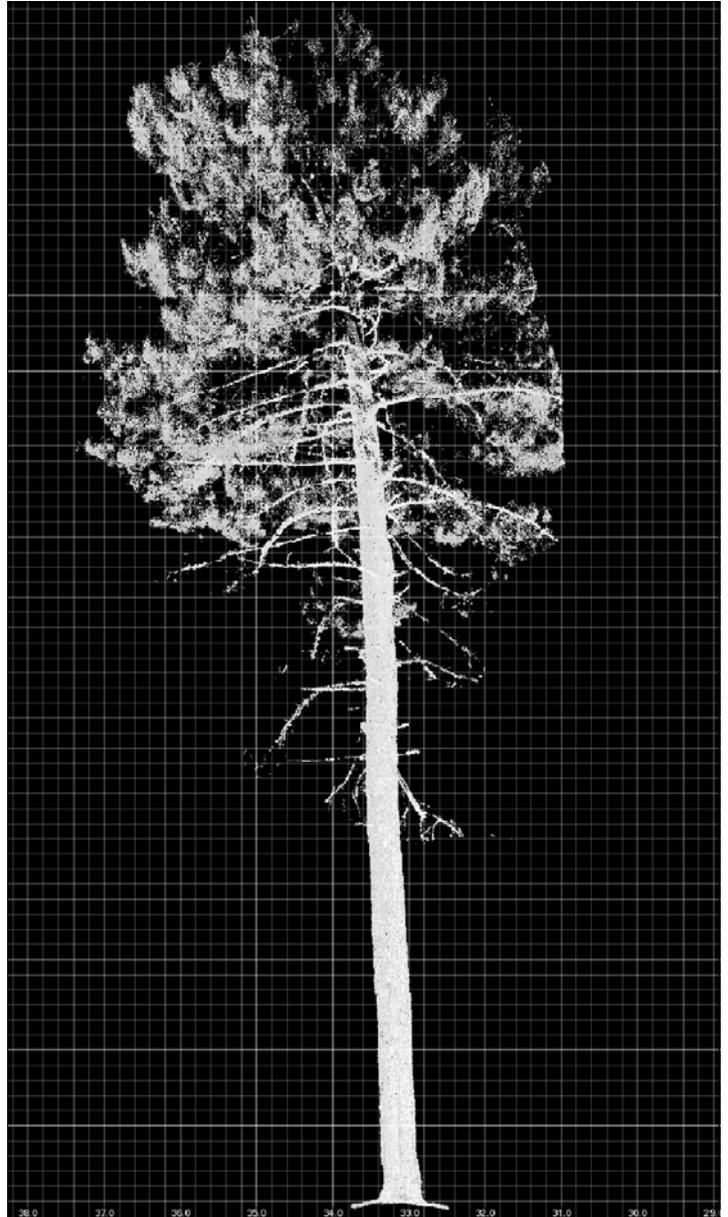
Ficha técnica árbol 12, parcela 2.

LOCALIZACION: Mata de Cuellar (Segovia)
COORDENADAS UTM: 41° 22' N - 4° 29' O
PARCELA: Parcela 2
ARBOL: Numero 12

ALTURA: 15.98 m
ALTURA DE COPA: 6.45 m
DIAMETRO COPA: 6.82 m
DIAMETRO DE TRONCO: 45.1 cm

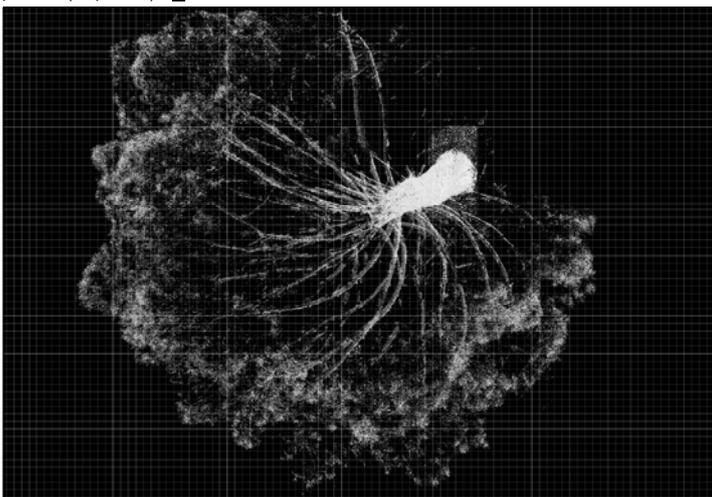


alzado frontal (norte) e_1:100

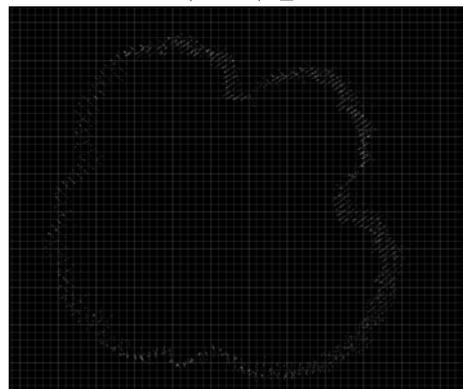


alzado lateral (este) e_1:100

planta (superior) e_1:100



seccion del tronco (h=1.30) e_1:10



ANEJO 3

Programa y resultados estadísticos (SAS)

Alumno: Sara Uzquiano Pérez
UNIVERSIDAD DE VALLADOLID (CAMPUS DE PALENCIA) – E.T.S. DE INGENIERÍAS AGRARIAS
Titulación de: Máster en Ingeniería de Montes

PROGRAMA SAS:

Modelos de regresión lineal para cada una de las variables estudiadas.

```
/* ***** ALTURA ***** */
```

```
data lidar2;  
set ALTURA.lidar;  
/*elimino el árbol 54 de la parcela 7 ya el árbol tomado con lidar no  
coincide con el árbol tomado en campo*/  
if Parcela=7 and arbol=54 then delete;  
RUN;
```

```
ods graphics on;  
PROC REG DATA=LIDAR2 outest=reg01 tableout;  
MODEL H_Conv=H_lidar;  
output out=error p=predicho r=error rstudent=t;  
test intercept=0, H_Lidar=1;  
RUN;  
ods graphics off;
```

```
ods graphics on;  
proc univariate data=error normal;  
var error;  
probplot error;  
run;  
ods graphics off;
```

```
proc gplot data=error;  
plot t*predicho=1;  
symbol1 v=circle c=blue;  
run;  
quit;
```

```
data error2;  
set error;  
if t>2.5 or t<-2.5;  
run;
```

```
proc print data=error2;  
run;
```

```
/* ***** AREA BASIMETRICA ***** */
```

```
data lidar2;  
set ALTURA.AB;  
RUN;
```

```
ods graphics on;  
PROC REG DATA=LIDAR2 outest=reg01 tableout;  
MODEL ab_Conv=ab_lidar;  
output out=error p=predicho r=error rstudent=t;  
test intercept=0, ab_Lidar=1;  
RUN;  
ods graphics off;
```

```

ods graphics on;
proc univariate data=error normal;
var error;
probplot error;
run;
ods graphics off;

proc gplot data=error;
plot t*predicho=1;
symbol1 v=circle c=blue;
run;
quit;

data error2;
set error;
if t>2.5 or t<-2.5;
run;

proc print data=error2;
run;

/* ***** ALTURA DE COPA ***** */

data lidar2;
set ALTURA.Altcopas;
if Parcela=7 and arbol=15 then delete;
/* if Parcela=7 and arbol=43 then delete; */

RUN;

ods graphics on;
PROC REG DATA=LIDAR2 outest=reg01 tableout;
MODEL Conv=lidar;
output out=error p=predicho r=error rstudent=t;
test intercept=0, Lidar=1;
RUN;
ods graphics off;

ods graphics on;
proc univariate data=error normal;
var error;
probplot error;
run;
ods graphics off;

proc gplot data=error;
plot t*predicho=1;
symbol1 v=circle c=blue;
run;
quit;

data error2;
set error;
if t>2.5 or t<-2.5;
run;

proc print data=error2;
run;

```

```

/* ***** ANCHURA DE COPA ***** */

data lidar2;
set ALTURA.Anchcopas;
/*if Parcela=10 and arbol=23 then delete;

if Parcela=2 and arbol=67 then delete;
if Parcela=10 and arbol=39 then delete;
if Parcela=10 and arbol='sn' then delete;*/

RUN;

ods graphics on;
PROC REG DATA=LIDAR2 outest=reg01 tableout;
MODEL Conv=lidar;
output out=error p=predicho r=error rstudent=t;
test intercept=0, Lidar=1;
test Lidar=1;
RUN;
ods graphics off;

ods graphics on;
proc univariate data=error normal;
var error;
probplot error;
run;
ods graphics off;

proc gplot data=error;
plot t*predicho=1;
symbol1 v=circle c=blue;
run;
quit;

data error2;
set error;
if t>2.5 or t<-2.5;
run;

proc print data=error2;
run;

/* ***** ALTURA CON FOTOTGRAMETRIA ***** */

data lidar2;
set ALTURA.Hfoto;
H_Conv2=H_Conv**2;
H_fotog2=H_fotog**2;
lnH_Conv=log(H_Conv);
lnH_fotog=log(H_fotog);

if Parcela=7 and arbol=28 then delete;
RUN;

ods graphics on;
PROC REG DATA=LIDAR2 outest=reg01 tableout;
MODEL H_Conv=H_fotog;
output out=error p=predicho r=error rstudent=t;
test intercept=0, H_fotog=1;

```

```

test H_fotog=1;
RUN;
ods graphics off;

ods graphics on;
proc univariate data=error normal;
var error;
probplot error;
run;
ods graphics off;

proc gplot data=error;
plot t*predicho=1;
symbol1 v=circle c=blue;
run;
quit;

data error2;
set error;
if t>2.5 or t<-2.5;
run;

proc print data=error2;
run;

/* ***** DIAMETRO NORMAL ***** */

data lidar2;
set ALTURA.DBH;
DBH_Conv2=DBH_Conv**2;
DBH_lidar2=DBH_LIDAR**2;
lnDBH_Conv=log(DBH_Conv);
lnDBH_lidar=log(DBH_lidar);

if Parcela=7 and arbol=54 then delete;
if Parcela=10 and arbol=1 then delete;
if Parcela=10 and arbol=11 then delete;

if parcela=10 then delete;

/*if Parcela=10 and arbol=15 then delete;
if Parcela=10 and arbol=20 then delete;
if Parcela=10 and arbol=23 then delete;
if Parcela=10 and arbol=35 then delete;*/

RUN;

ods graphics on;
PROC REG DATA=LIDAR2 outest=reg01 tableout;
MODEL DBH_Conv=DBH_lidar;
output out=error p=predicho r=error rstudent=t;
test intercept=0, DBH_lidar=1;
test DBH_lidar=1;
RUN;
ods graphics off;

ods graphics on;
proc univariate data=error normal;
var error;

```

```

probplot error;
run;
ods graphics off;

proc gplot data=error;
plot t*predicho=1;
symbol1 v=circle c=blue;
run;
quit;

data error2;
set error;
if t>2.5 or t<-2.5;
run;

proc print data=error2;
run;

ods graphics on;
PROC MIXED data=lidar2 method=reml plots(only)=(RESIDUALPANEL
BoxPlot(observed fixed subject));
MODEL DBH_Conv=DBH_lidar / solution outpm=databasel2 residual;
repeated /group=Parcela;
estimate 'a' intercept 1/cl;
estimate 'b' DBH_lidar -10 1/cl;
run;
ods graphics off;

ods graphics on;
proc univariate data=databasel2;
var studentresid;
histogram studentresid / normal;
probplot studentresid / normal;
run;
ods graphics off;

/* ***** DIAMETRO DE AREA BASIMETRICA ***** */

* se crea un modelo de los diámetros normales de aquellos arboles que
entran en las subparcelas creadas para el estudio del área
basimétrica, por ello la librería se llamara d_ab haciendo referencia
a los diámetros del área basimétrica*/

libname d_ab'D:\AA Proyecto fin master\SAS';

/*parcelas*/

PROC IMPORT OUT= WORK.LIDAR
DATAFILE= "D:\AA Proyecto fin master\SAS\SAS
junto\d_juntas.xlsx"
DBMS=EXCEL REPLACE;
RANGE="d_juntas$";
GETNAMES=YES;
MIXED=YES;
SCANTEXT=YES;
USEDATE=YES;
SCANTIME=YES;
RUN;

```

```

data lidar2;
set lidar;
D_conv2=D_conv**2; D_lidar2=D_lidar**2;
if parcela=7 and arbol=56 then delete;
run;

ods graphics on;
PROC REG DATA=LIDAR2 outest=reg01 tableout;
MODEL D_conv2=D_lidar2;
output out=error p=predicho r=error rstudent=t;
test intercept=0, D_lidar2=1;
test D_lidar2=1;
RUN;
ods graphics off;

ods graphics on;
proc univariate data=error normal;
var error;
probplot error;
run;
ods graphics off;

proc gplot data=error;
plot t*predicho=1;
symbol1 v=circle c=blue;
run;
quit;

data error2;
set error;
if t>2.5 or t<-2.5;
run;

proc print data=error2;
run;

```

– ALTURA

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

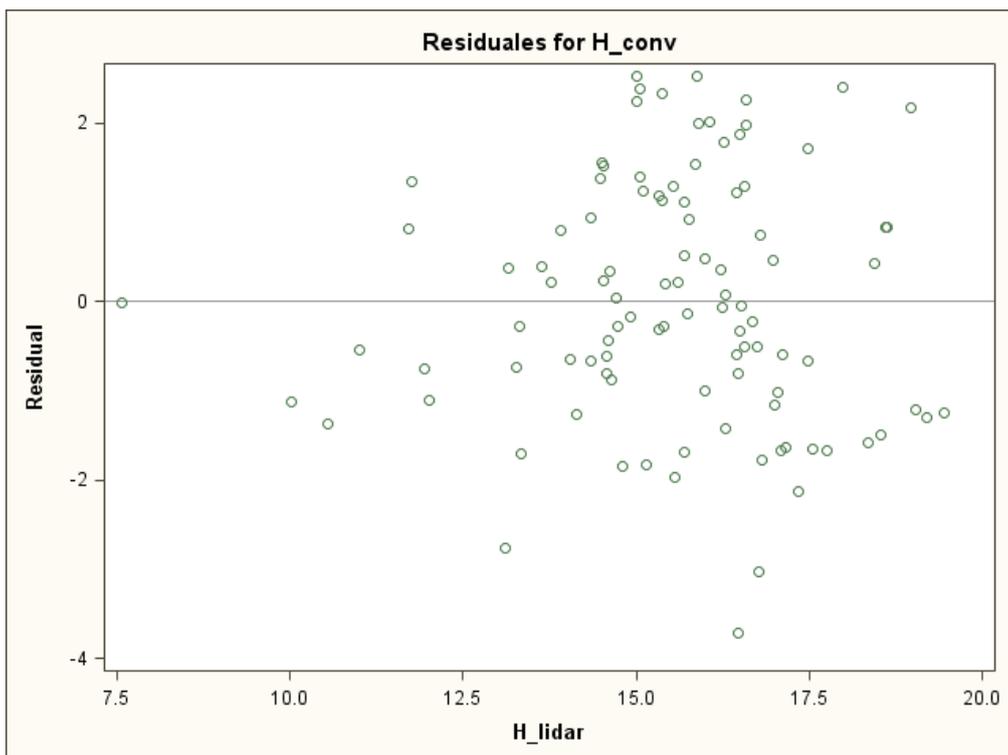
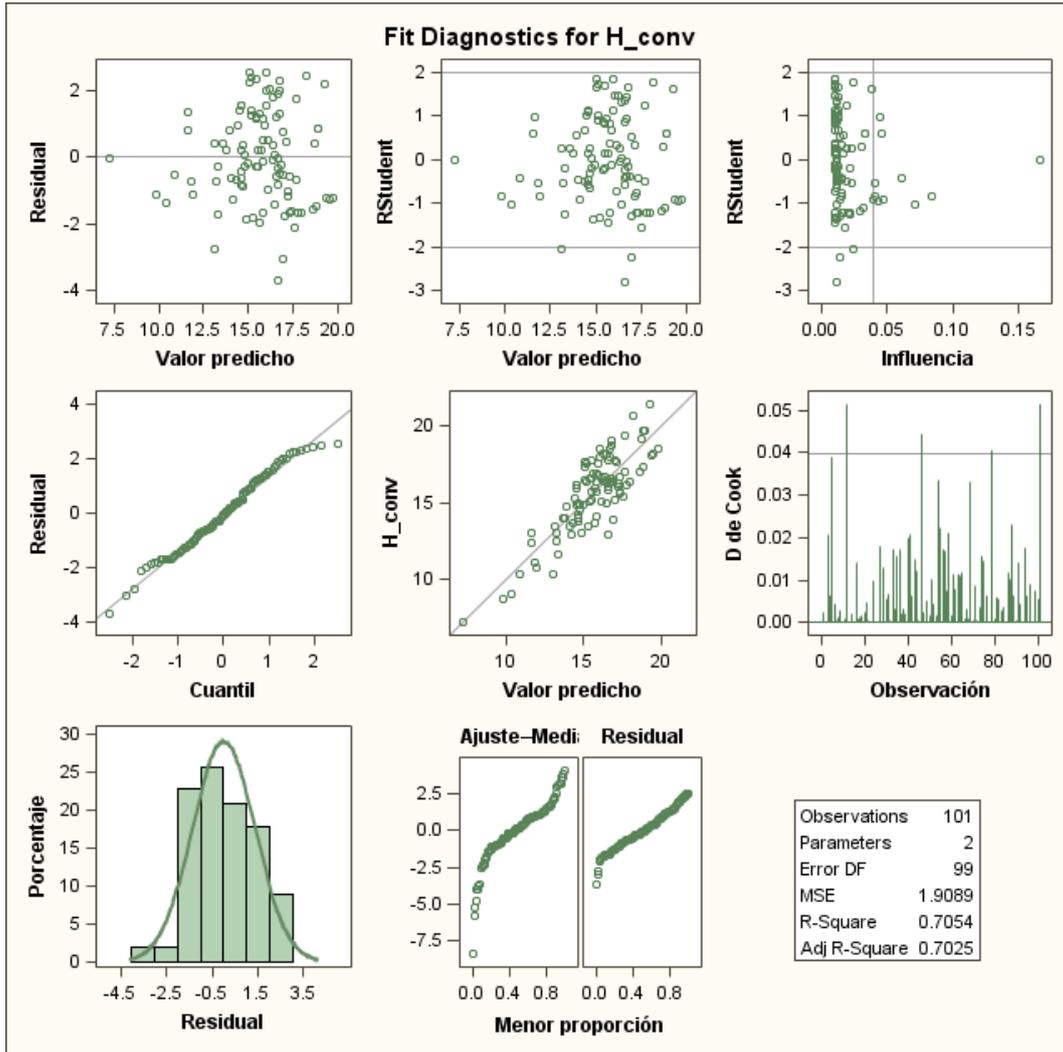
Variable dependiente: H_conv

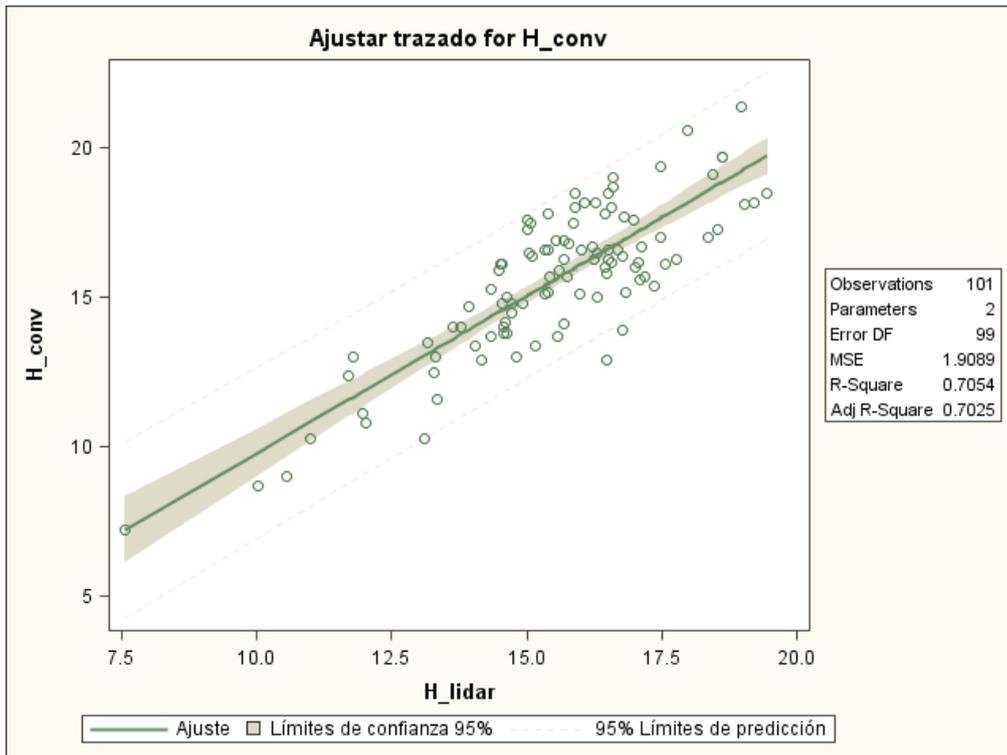
Número de observaciones leídas	102
Número de observaciones usadas	102

Análisis de la varianza					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	452.59822	452.59822	237.09	<.0001
Error	99	188.98475	1.90894		
Total corregido	100	641.58297			

Raíz MSE	1.38164	R-cuadrado	0.7054
Media dependiente	15.62376	Adj R-Sq	0.7025
Coeff Var	8.84321		

Estimadores de parámetros					
Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	-0.74440	1.07187	-0.69	0.4890
H_lidar	1	1.05379	0.06844	15.40	<.0001





Resultados 1 de test para variable dependiente H_conv				
Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	2	1.00809	0.53	0.5914
Denominador	99	1.90894		

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)

Momentos			
N	101	Sumar pesos	101
Media	0	Observ suma	0
Desviación std	1.37471723	Varianza	1.88984746
Asimetría	-0.0562671	Curtosis	-0.5373237
SC no corregida	188.984746	SC corregida	188.984746
Coef. variación	.	Media error std	0.13678948

Medidas estadísticas básicas			
Ubicación		Variabilidad	
Media	0.00000	Desviación std	1.37472
Mediana	-0.06908	Varianza	1.88985
Moda	.	Rango	6.23326
		Rango intercuantil	2.16509

Tests para posición: Mu0=0

Test	Estadístico		P-valor	
T de Student	t	0	Pr > t	1.0000
Signo	M	-2.5	Pr >= M	0.6908
Puntuación con signo	S	11.5	Pr >= S	0.9692

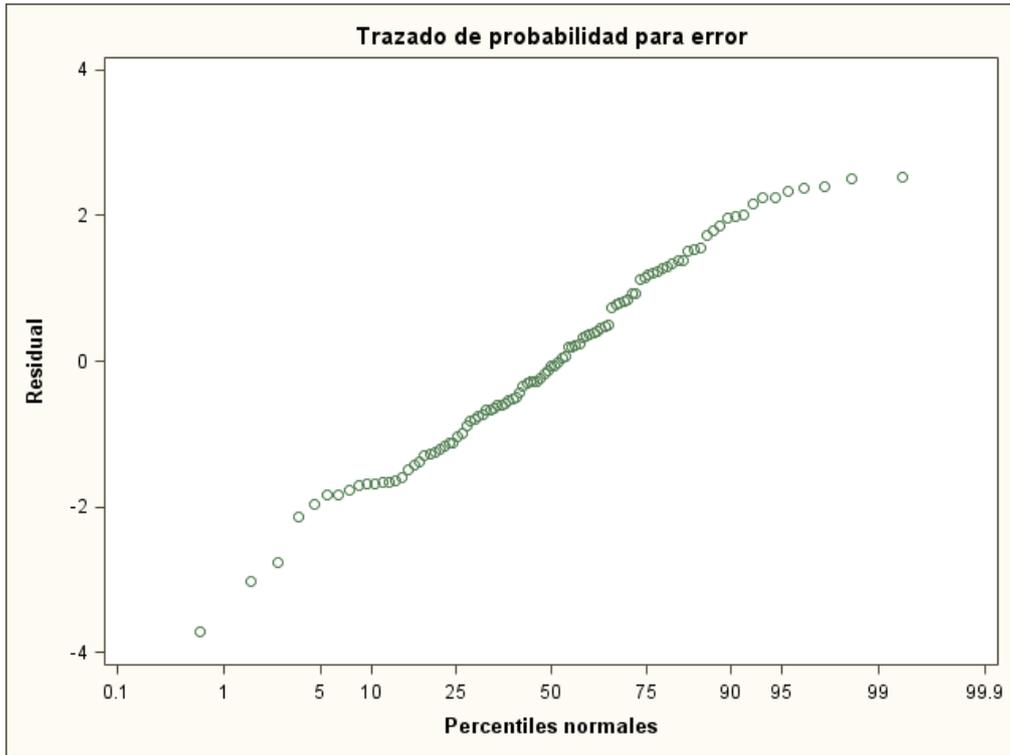
Tests para normalidad				
Test	Estadístico		P-valor	
Shapiro-Wilk	W	0.981043	Pr < W	0.1556
Kolmogorov-Smirnov	D	0.058826	Pr > D	>0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq	0.061992	Pr > W-Sq	>0.2500
Anderson-Darling	A-Sq	0.465499	Pr > A-Sq	>0.2500

Cuantiles (Definición 5)	
Cuantil	Estimador
100% Máx	2.5218064
99%	2.5155508
95%	2.2515563
90%	1.9673631
75% Q3	1.1371747
50% Mediana	-0.0690809
25% Q1	-1.0279161
10%	-1.6761039
5%	-1.8463608
1%	-3.0275872
0% Mín	-3.7114516

Observaciones extremas			
Inferior		Superior	
Valor	Observación	Valor	Observación
-3.71145	46	2.33191	75
-3.02759	54	2.37439	35
-2.77073	101	2.39733	5
-2.13351	55	2.51555	36
-1.96304	87	2.52181	27

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)



Obs	parcela	arbol	H_conv	H_lidar	F5	predicho	error	t
1	7	19	12.9	16.5	arbol inclinado	16.6115	-3.71145	-2.79396

– AREA BASIMETRICA

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: ab_conv

Número de observaciones leídas	15
Número de observaciones usadas	15

Análisis de la varianza					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	29168	29168	568.12	<.0001
Error	13	667.44755	51.34212		
Total corregido	14	29836			

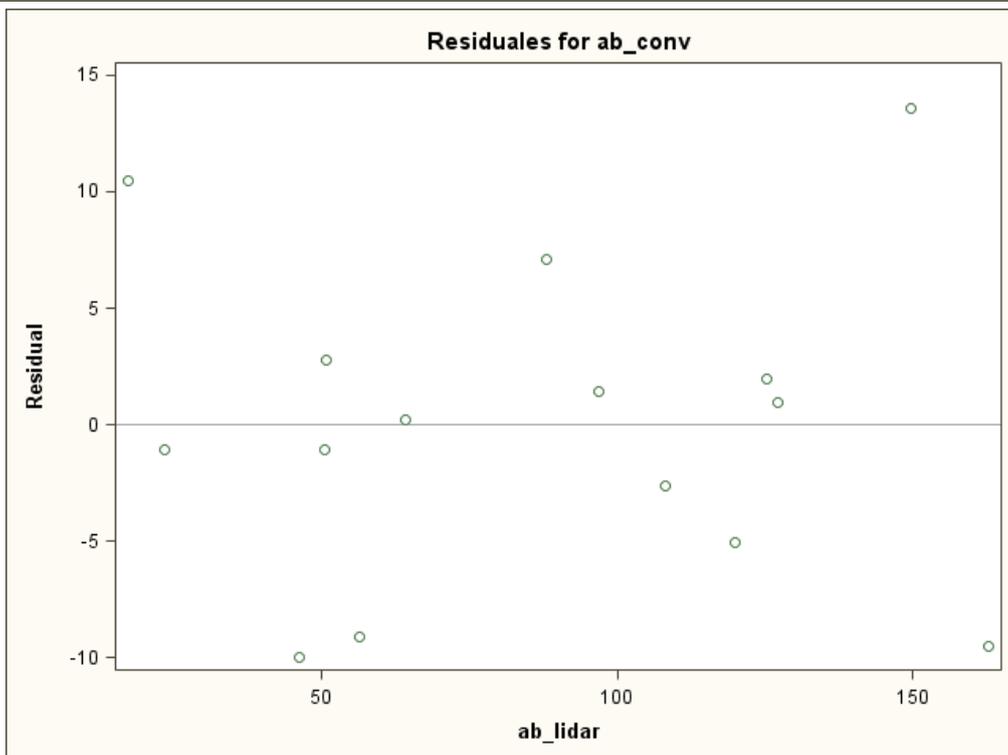
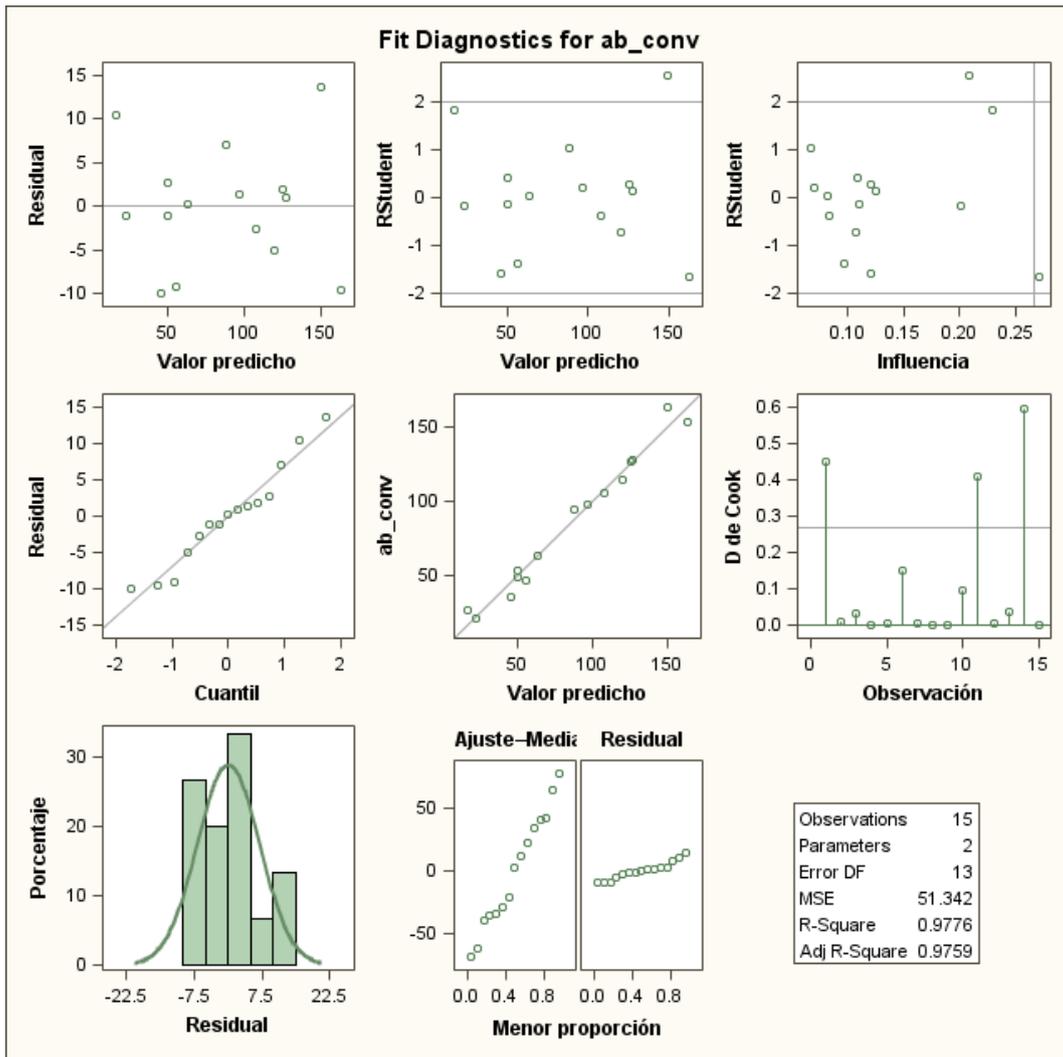
Raíz MSE	7.16534	R-cuadrado	0.9776
Media dependiente	85.35246	Adj R-Sq	0.9759
Coeff Var	8.39500		

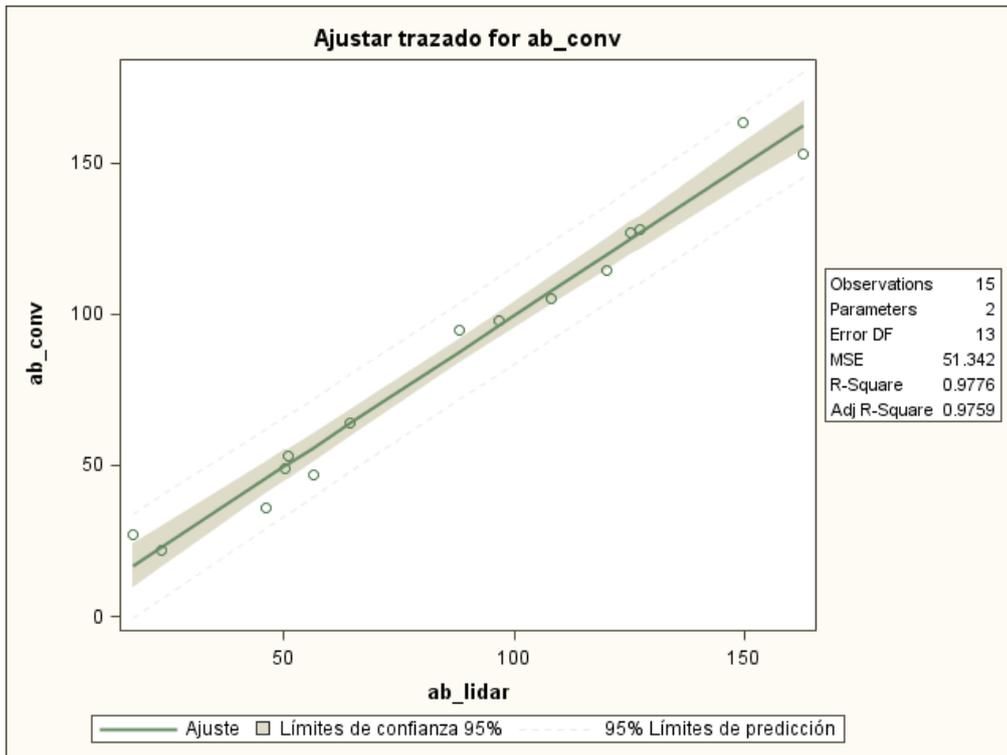
Estimadores de parámetros					
Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	-0.62656	4.05400	-0.15	0.8795
ab_lidar	1	1.00211	0.04204	23.84	<.0001

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: ab_conv





Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 1 de test para variable dependiente ab_conv				
Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	2	1.55544	0.03	0.9702
Denominador	13	51.34212		

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)

Momentos			
N	15	Sumar pesos	15
Media	0	Observ suma	0
Desviación std	6.90469589	Varianza	47.6748253
Asimetría	0.32018457	Curtosis	-0.1724106
SC no corregida	667.447554	SC corregida	667.447554
Coef. variación	.	Media error std	1.78278481

Medidas estadísticas básicas			
Ubicación		Variabilidad	
Media	0.000000	Desviación std	6.90470
Mediana	0.192525	Varianza	47.67483
Moda	.	Rango	23.56281
		Rango intercuantil	7.84792

Tests para posición: Mu0=0			
Test	Estadístico	P-valor	
T de Student	t	0	Pr > t 1.0000

Signo	M	0.5	Pr >= M 	1.0000
Puntuación con signo	S	1	Pr >= S 	0.9780

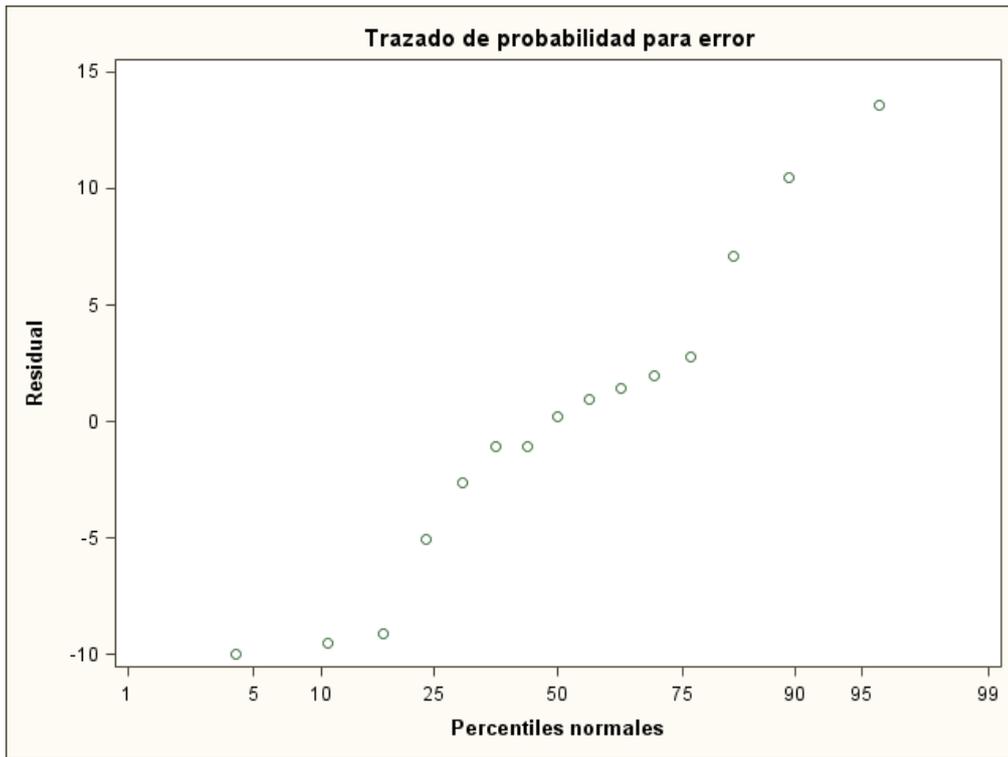
Tests para normalidad				
Test	Estadístico		P-valor	
Shapiro-Wilk	W	0.951273	Pr < W	0.5447
Kolmogorov-Smirnov	D	0.142784	Pr > D	>0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq	0.044632	Pr > W-Sq	>0.2500
Anderson-Darling	A-Sq	0.298324	Pr > A-Sq	>0.2500

Cuantiles (Definición 5)	
Cuantil	Estimador
100% Máx	13.580951
99%	13.580951
95%	13.580951
90%	10.459884
75% Q3	2.795546
50% Mediana	0.192525
25% Q1	-5.052374
10%	-9.531414
5%	-9.981856
1%	-9.981856
0% Mín	-9.981856

Observaciones extremas			
Inferior		Superior	
Valor	Observación	Valor	Observación
-9.98186	6	1.94536	12
-9.53141	1	2.79555	2
-9.10261	10	7.12277	13
-5.05237	3	10.45988	11
-2.65503	5	13.58095	14

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)



Obs	parcela	subarea	ab_conv	ab_lidar	predicho	error	t
1	10	4	163.06	149.79	149.476	13.5810	2.53499

– ALTURA DE COPA

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: Conv

Número de observaciones leídas	53
Número de observaciones usadas	53

Análisis de la varianza					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	112.24710	112.24710	56.95	<.0001
Error	51	100.52743	1.97113		
Total corregido	52	212.77453			

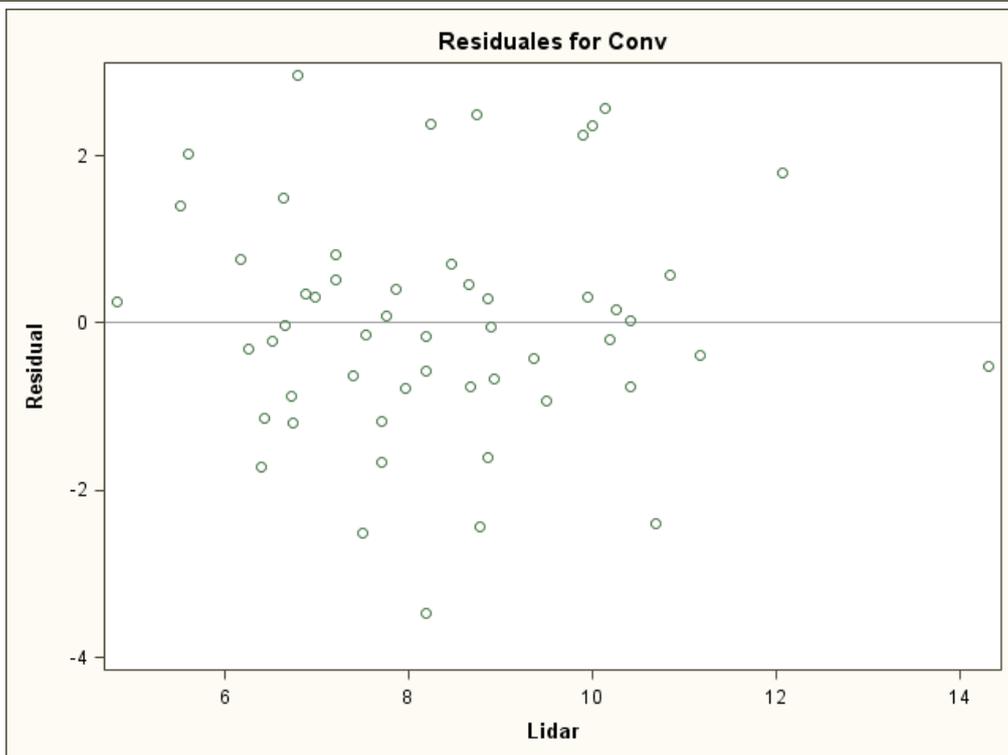
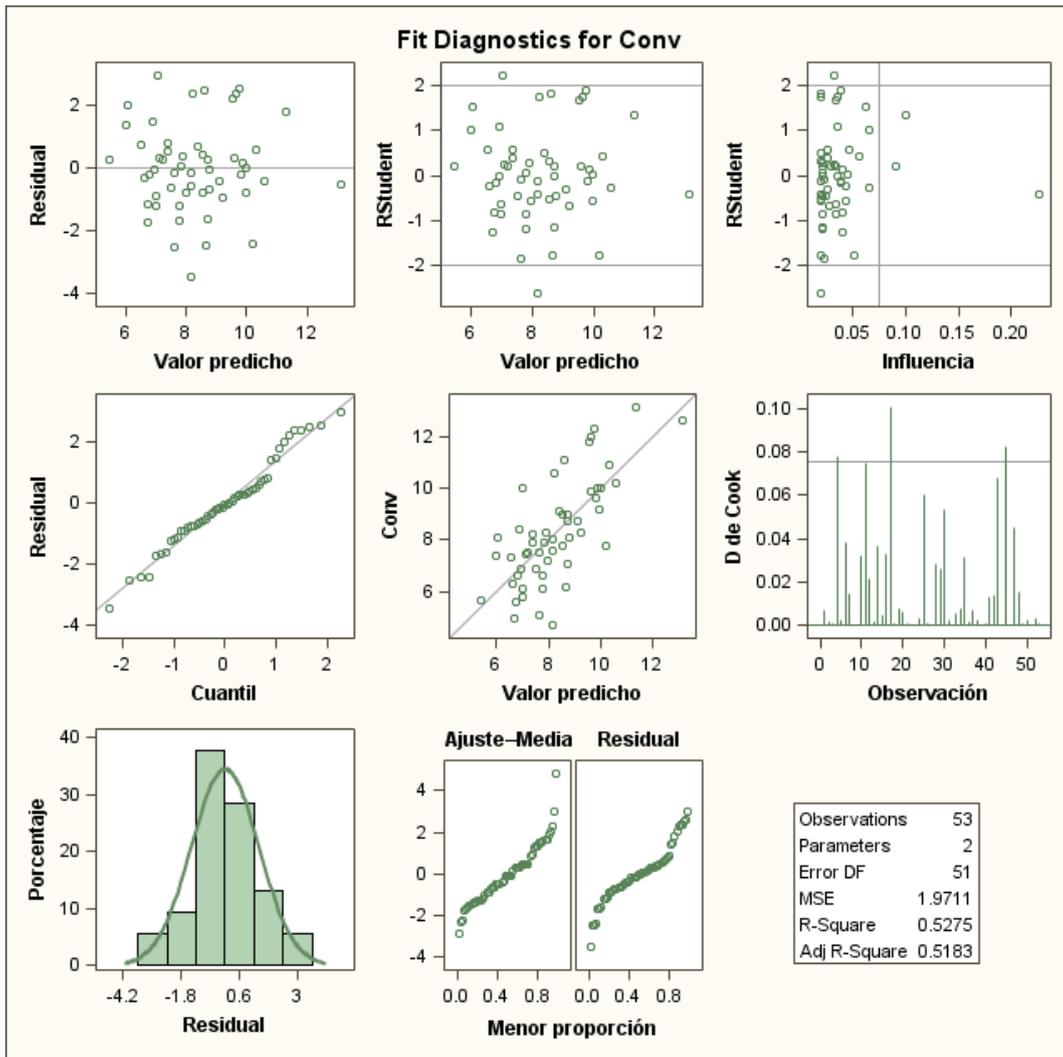
Raíz MSE	1.40397	R-cuadrado	0.5275
Media dependiente	8.28774	Adj R-Sq	0.5183
Coeff Var	16.94031		

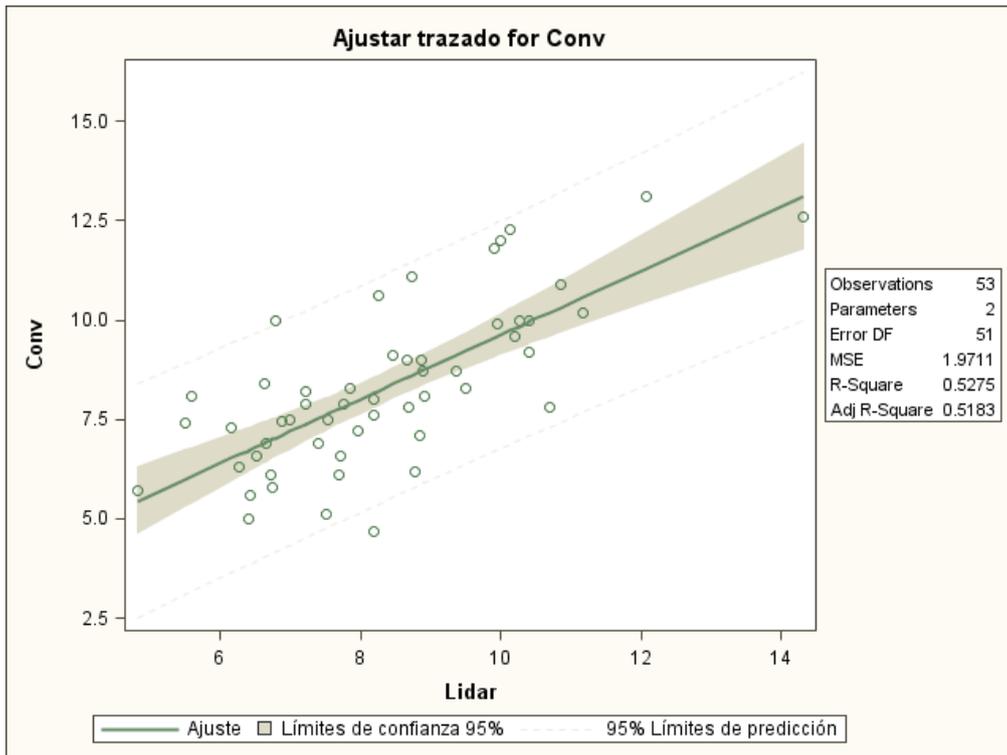
Estimadores de parámetros					
Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	1.54794	0.91372	1.69	0.0963
Lidar	1	0.80831	0.10711	7.55	<.0001

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: Conv





Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 1 de test para variable dependiente Conv				
Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	2	3.22354	1.64	0.2049
Denominador	51	1.97113		

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)

Momentos			
N	53	Sumar pesos	53
Media	0	Observ suma	0
Desviación std	1.39040274	Varianza	1.93321977
Asimetría	0.07339658	Curtosis	0.11448566
SC no corregida	100.527428	SC corregida	100.527428
Coef. variación	.	Media error std	0.1909865

Medidas estadísticas básicas			
Ubicación		Variabilidad	
Media	0.00000	Desviación std	1.39040
Mediana	-0.04192	Varianza	1.93322
Moda	.	Rango	6.43568
		Rango intercuantil	1.34596

Tests para posición: Mu0=0			
Test	Estadístico	P-valor	
T de Student	t	0	Pr > t 1.0000

Signo	M	-1.5	Pr >= M 	0.7838
Puntuación con signo	S	-29.5	Pr >= S 	0.7968

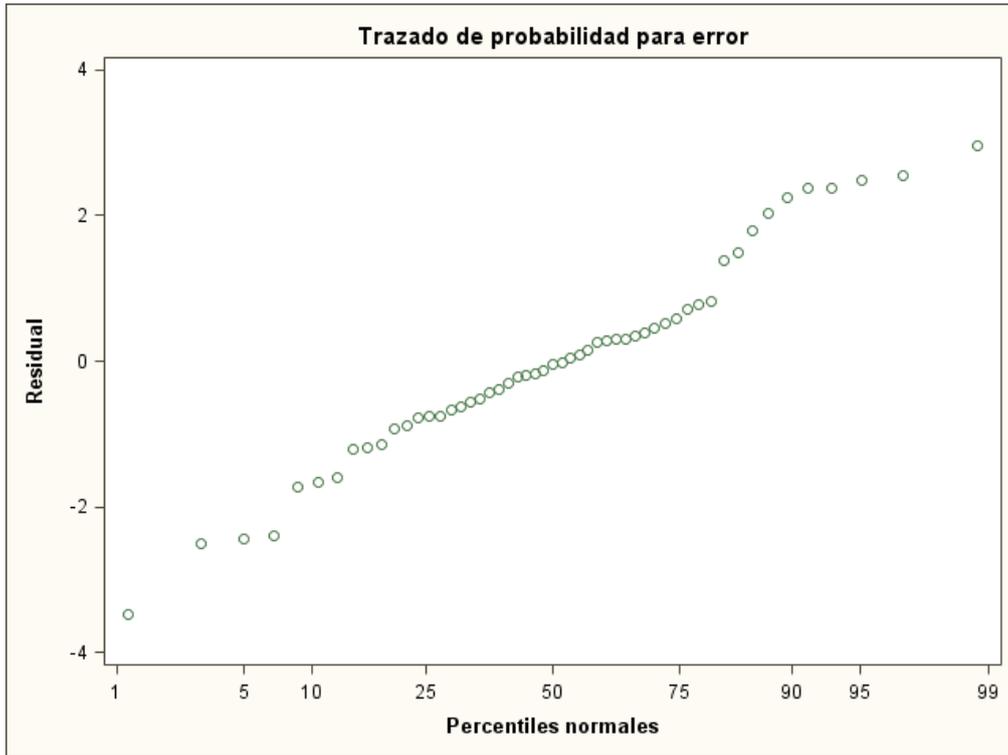
Tests para normalidad				
Test	Estadístico		P-valor	
Shapiro-Wilk	W	0.974611	Pr < W	0.3164
Kolmogorov-Smirnov	D	0.09251	Pr > D	>0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq	0.087886	Pr > W-Sq	0.1634
Anderson-Darling	A-Sq	0.549698	Pr > A-Sq	0.1534

Cuantiles (Definición 5)	
Cuantil	Estimador
100% Máx	2.9636229
99%	2.9636229
95%	2.4874142
90%	2.2497720
75% Q3	0.5818754
50% Mediana	-0.0419158
25% Q1	-0.7640871
10%	-1.6719412
5%	-2.4408768
1%	-3.4720557
0% Mín	-3.4720557

Observaciones extremas			
Inferior		Superior	
Valor	Observación	Valor	Observación
-3.47206	25	2.36894	30
-2.51432	6	2.38349	28
-2.44088	35	2.48741	10
-2.39284	45	2.55982	43
-1.72114	16	2.96362	4

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)



Obs	parcela	arbol	Conv	Lidar	F5	predicho	error	t
1	7	22	4.70	8.20		8.17206	-3.47206	-2.63879

– ANCHURA DE COPA

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: Conv

Número de observaciones leídas	54
Número de observaciones usadas	54

Análisis de la varianza					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	237.23598	237.23598	174.65	<.0001
Error	52	70.63589	1.35838		
Total corregido	53	307.87186			

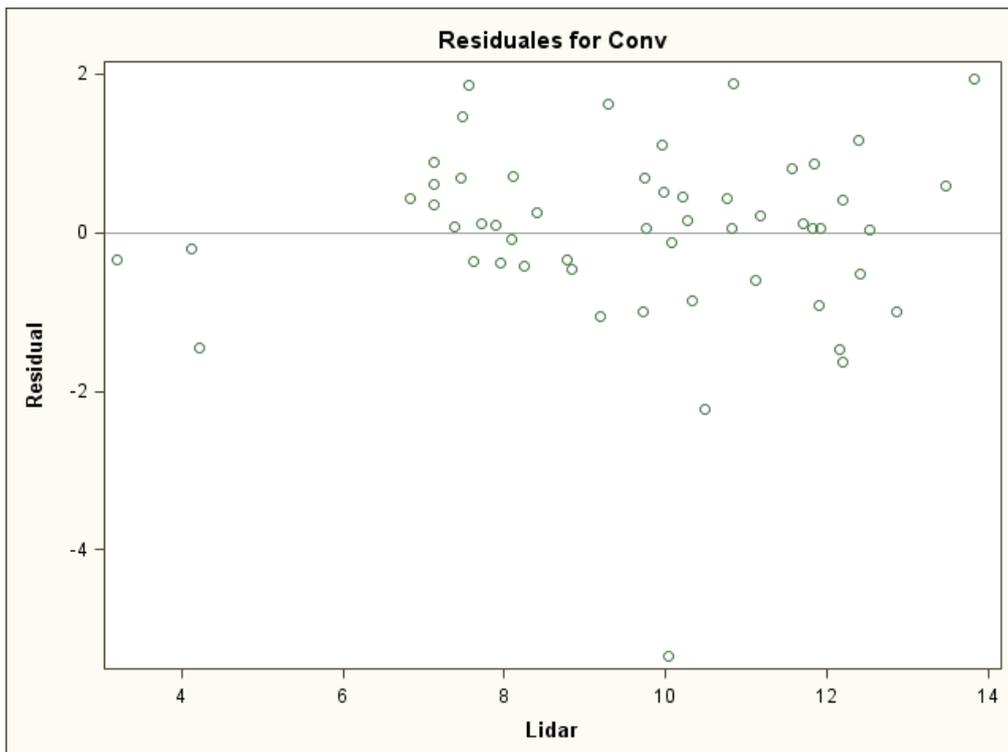
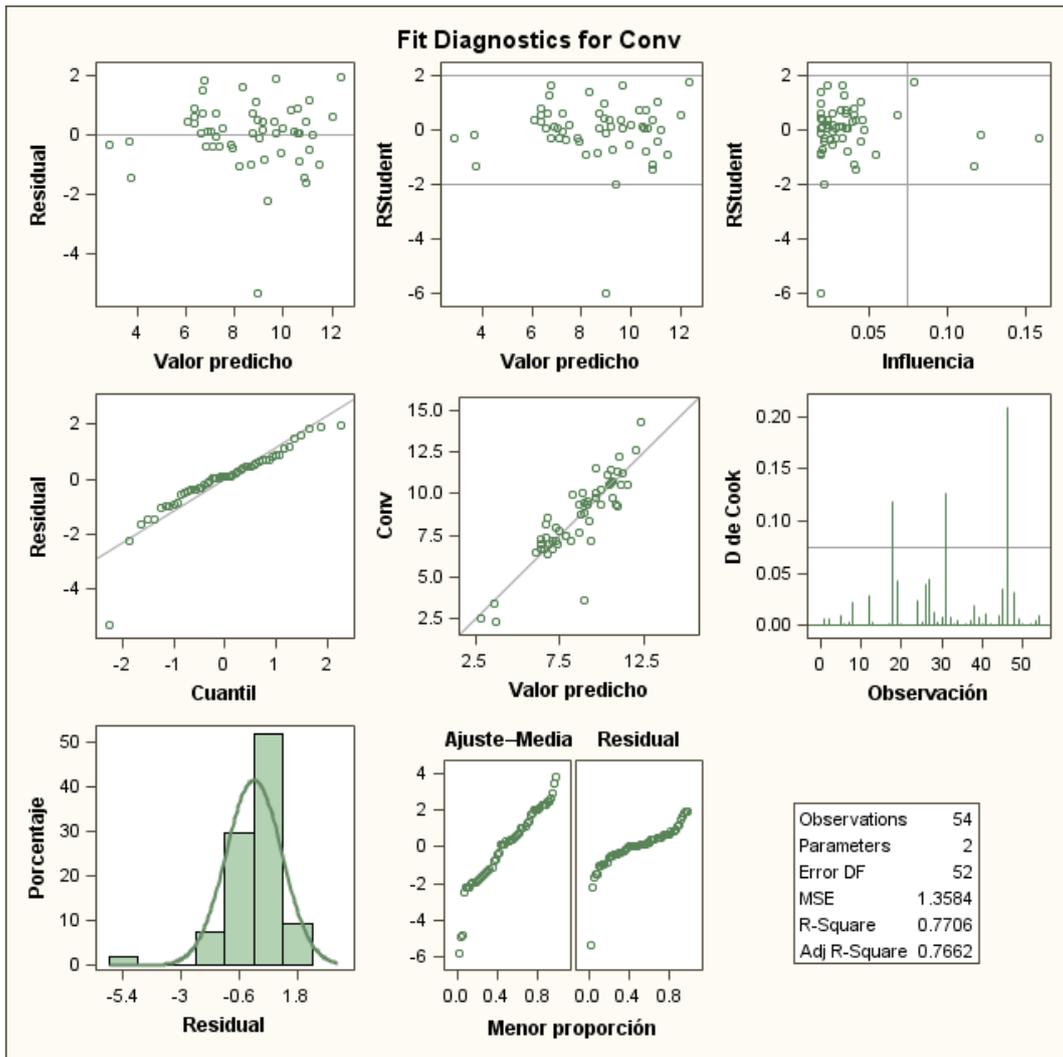
Raíz MSE	1.16550	R-cuadrado	0.7706
Media dependiente	8.59954	Adj R-Sq	0.7662
Coeff Var	13.55302		

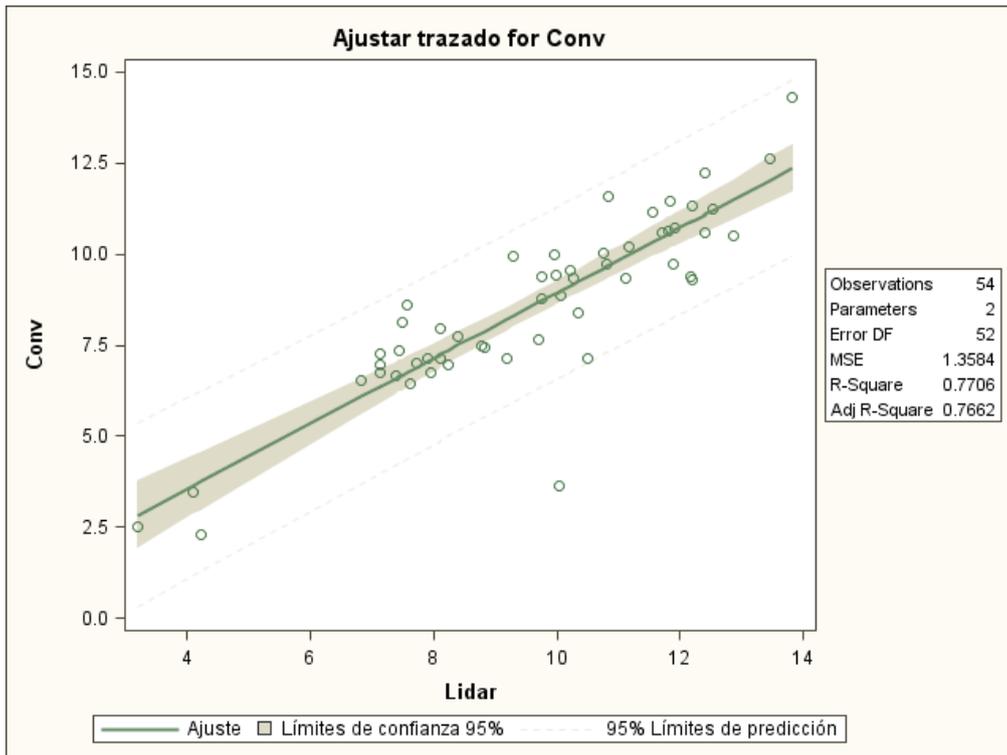
Estimadores de parámetros					
Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	-0.03440	0.67230	-0.05	0.9594
Lidar	1	0.89689	0.06787	13.22	<.0001

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: Conv





Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 1 de test para variable dependiente Conv				
Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	2	30.04219	22.12	<.0001
Denominador	52	1.35838		

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 2 de test para variable dependiente Conv				
Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	1	3.13519	2.31	0.1348
Denominador	52	1.35838		

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)

Momentos			
N	54	Sumar pesos	54
Media	0	Observ suma	0
Desviación std	1.15444902	Varianza	1.33275255
Asimetría	-1.8483115	Curtosis	7.74934993
SC no corregida	70.6358852	SC corregida	70.6358852
Coef. variación	.	Media error std	0.15710061

Medidas estadísticas básicas			
Ubicación		Variabilidad	
Media	0.000000	Desviación std	1.15445
Mediana	0.084369	Varianza	1.33275
Moda	.	Rango	7.28026
		Rango intercuantil	1.03401

Tests para posición: $\mu_0=0$			
Test	Estadístico	P-valor	
T de Student	t	0	Pr > t 1.0000
Signo	M	6	Pr >= M 0.1337
Puntuación con signo	S	88.5	Pr >= S 0.4512

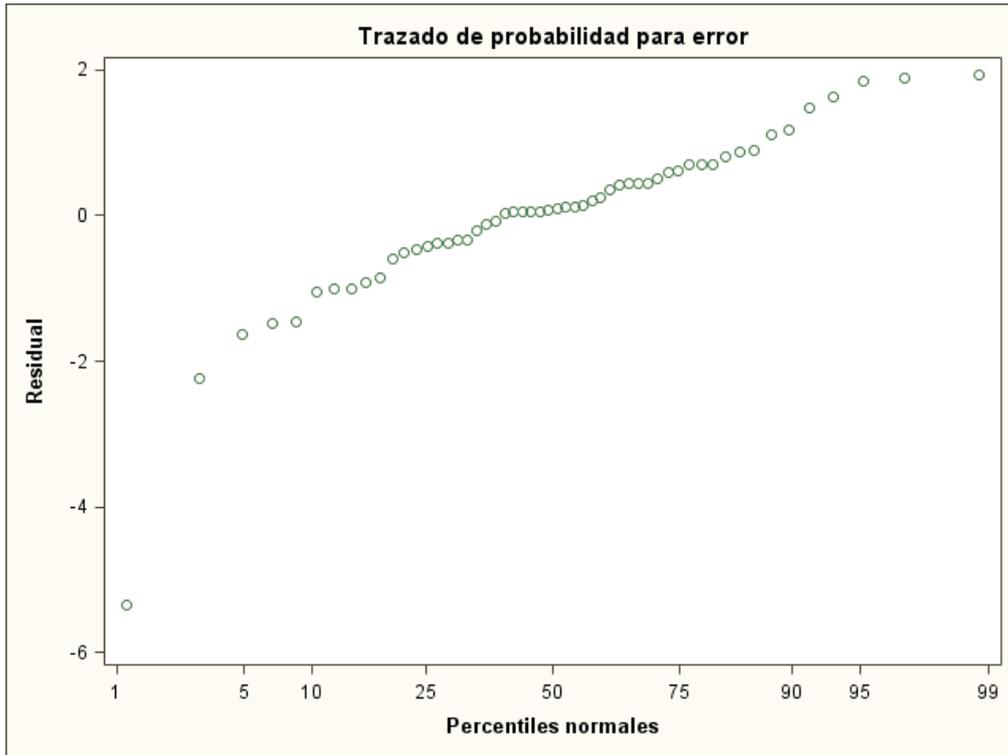
Tests para normalidad			
Test	Estadístico	P-valor	
Shapiro-Wilk	W	0.867308	Pr < W <0.0001
Kolmogorov-Smirnov	D	0.123566	Pr > D 0.0391
Cramer-von Mises	W-Sq	0.209009	Pr > W-Sq <0.0050
Anderson-Darling	A-Sq	1.269047	Pr > A-Sq <0.0050

Cuantiles (Definición 5)	
Cuantil	Estimador
100% Máx	1.9348356
99%	1.9348356
95%	1.8538785
90%	1.1718789
75% Q3	0.6190275
50% Mediana	0.0843691
25% Q1	-0.4149786
10%	-1.0580593
5%	-1.6327112
1%	-5.3454194
0% Mín	-5.3454194

Observaciones extremas			
Inferior		Superior	
Valor	Observación	Valor	Observación
-5.34542	46	1.47115	12
-2.22851	26	1.62277	38
-1.63271	19	1.85388	27
-1.47184	45	1.88258	48
-1.45946	18	1.93484	31

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)



Obs	parcela	arbol	Conv	Lidar	F5	predicho	error	t
1	10	23	3.63	10.04	mal medido en campo??	8.97042	-5.34542	-5.98272

– ALTURA CON FOTOGRAMETRIA

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: H_conv

Número de observaciones leídas	86
Número de observaciones usadas	86

Análisis de la varianza					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	375.61088	375.61088	113.35	<.0001
Error	84	278.34365	3.31361		
Total corregido	85	653.95453			

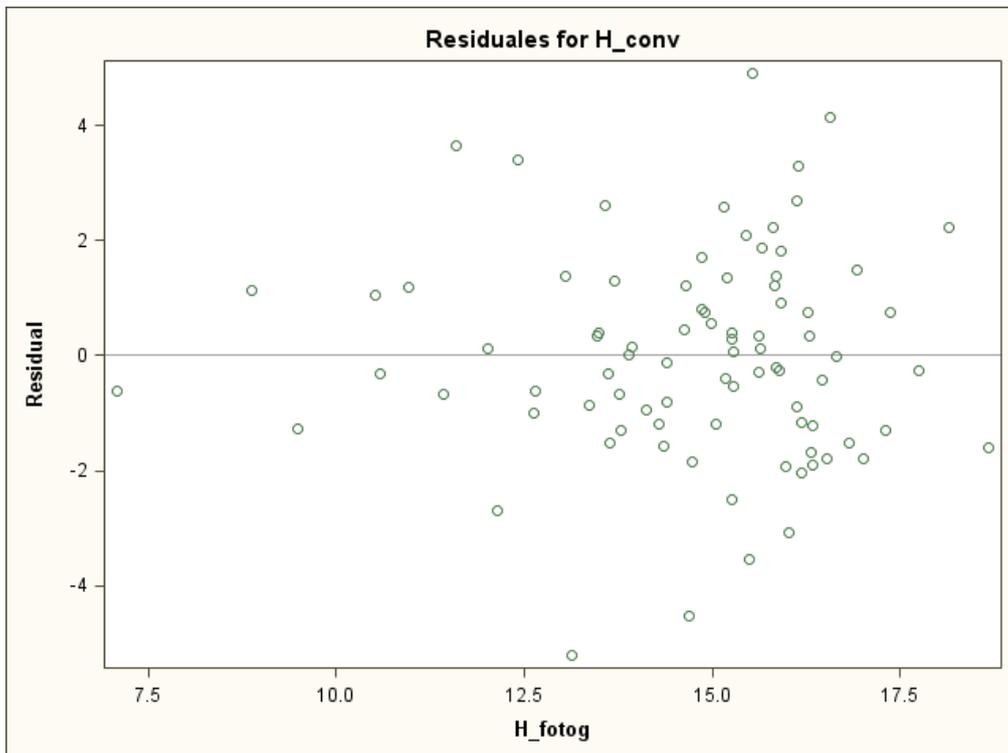
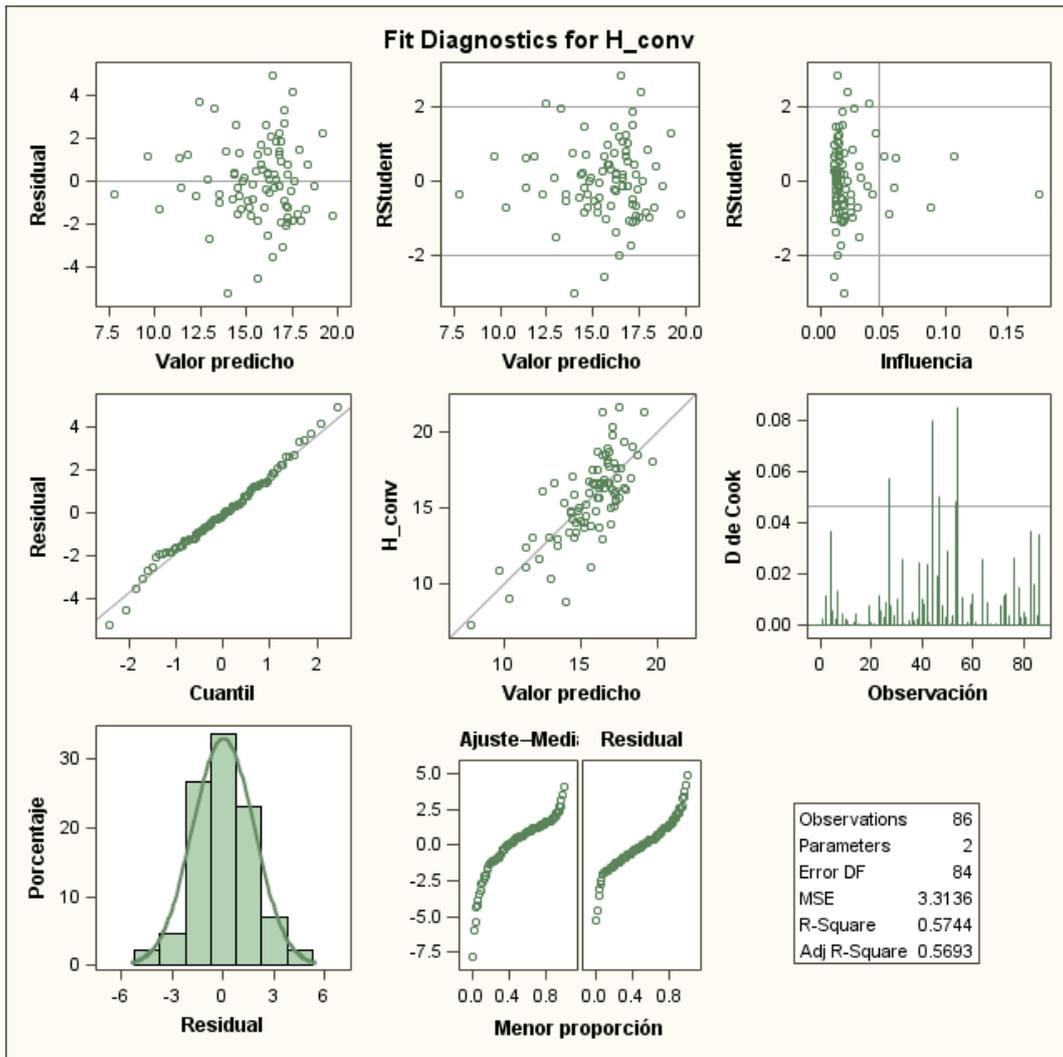
Raíz MSE	1.82033	R-cuadrado	0.5744
Media dependiente	15.65233	Adj R-Sq	0.5693
Coeff Var	11.62980		

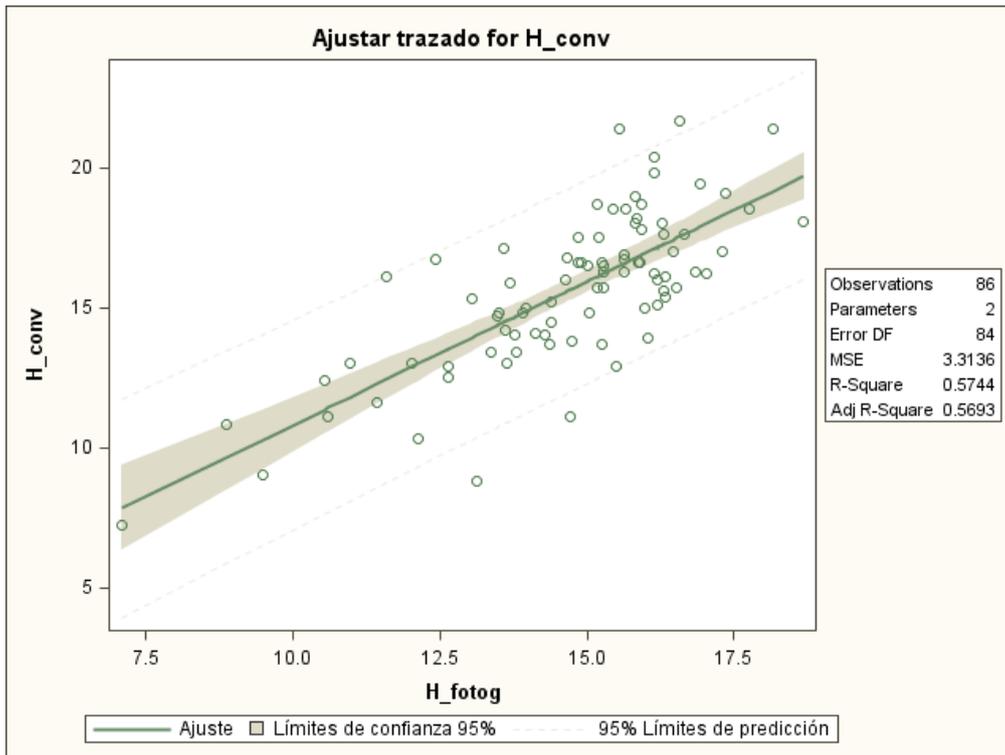
Estimadores de parámetros					
Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	0.56164	1.43092	0.39	0.6957
H_fotog	1	1.02482	0.09626	10.65	<.0001

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: H_conv





Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 1 de test para variable dependiente H_conv

Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	2	37.07515	11.19	<.0001
Denominador	84	3.31361		

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 2 de test para variable dependiente H_conv

Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	1	0.22039	0.07	0.7971
Denominador	84	3.31361		

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)

Momentos			
N	86	Sumar pesos	86
Media	0	Observ suma	0
Desviación std	1.8095942	Varianza	3.27463118
Asimetría	0.04008805	Curtosis	0.69043163
SC no corregida	278.34365	SC corregida	278.34365
Coef. variación	.	Media error std	0.19513356

Medidas estadísticas básicas			
Ubicación		Variabilidad	
Media	0.00000	Desviación std	1.80959
Mediana	-0.06728	Varianza	3.27463
Moda	.	Rango	10.14034
		Rango intercuantil	2.40401

Tests para posición: $\mu_0=0$			
Test	Estadístico	P-valor	
T de Student	t	0	Pr > t 1.0000
Signo	M	-1	Pr >= M 0.9142
Puntuación con signo	S	-28.5	Pr >= S 0.9032

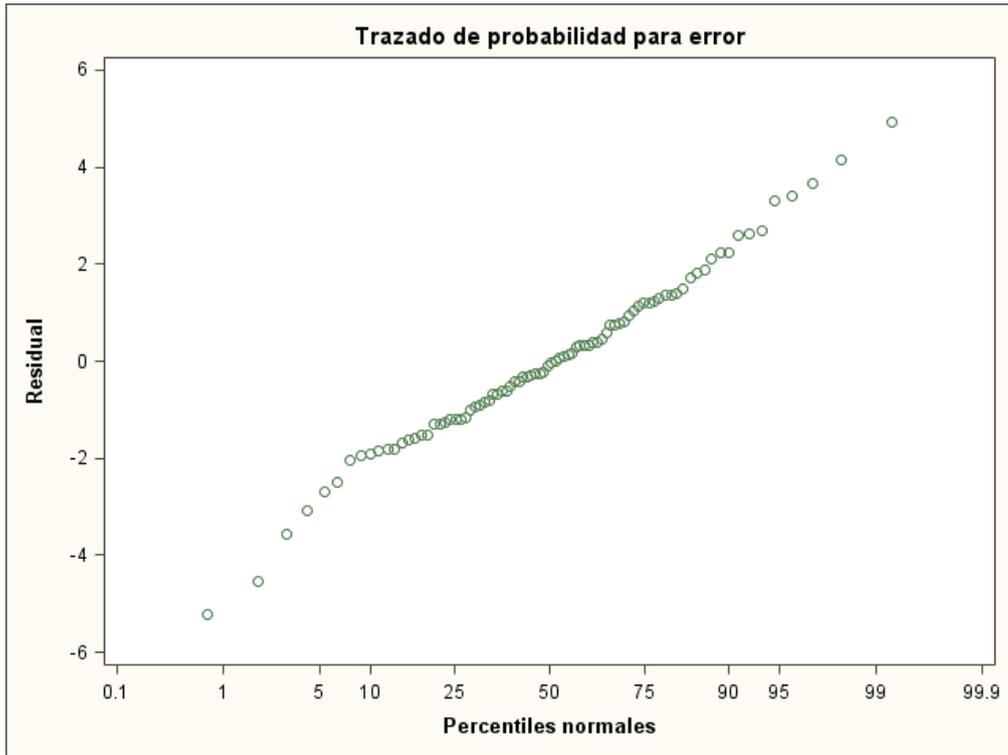
Tests para normalidad			
Test	Estadístico	P-valor	
Shapiro-Wilk	W	0.989191	Pr < W 0.7004
Kolmogorov-Smirnov	D	0.06103	Pr > D >0.1500
Cramer-von Mises	W-Sq	0.042352	Pr > W-Sq >0.2500
Anderson-Darling	A-Sq	0.313835	Pr > A-Sq >0.2500

Cuantiles (Definición 5)	
Cuantil	Estimador
100% Máx	4.918602
99%	4.918602
95%	3.295696
90%	2.235112
75% Q3	1.201990
50% Mediana	-0.067277
25% Q1	-1.202025
10%	-1.904041
5%	-2.698396
1%	-5.221738
0% Mín	-5.221738

Observaciones extremas			
Inferior		Superior	
Valor	Observación	Valor	Observación
-5.22174	44	3.29570	50
-4.53097	83	3.40243	53
-3.54953	32	3.65813	54
-3.09004	39	4.14674	27
-2.69840	86	4.91860	47

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)



Obs	Parcela	arbol	H_conv	H_fotog	H_Conv2	H_fotog2	InH_Conv	InH_fotog	predicho	error	t
1	7	54	8.8	13.1	77.44	172.504	2.17475	2.57521	14.0217	-5.221	-3.033
2	10	2	21.4	15.5	457.96	241.310	3.06339	2.74304	16.4814	4.918	2.831
3	10	44	11.1	14.7	123.21	216.217	2.40695	2.68814	15.6310	-4.530	-2.587

– DIÁMETRO NORMAL

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: DBH_conv

Número de observaciones leídas	60
Número de observaciones usadas	60

Análisis de la varianza					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	5532.91095	5532.91095	1212.90	<.0001
Error	58	264.58005	4.56172		
Total corregido	59	5797.49100			

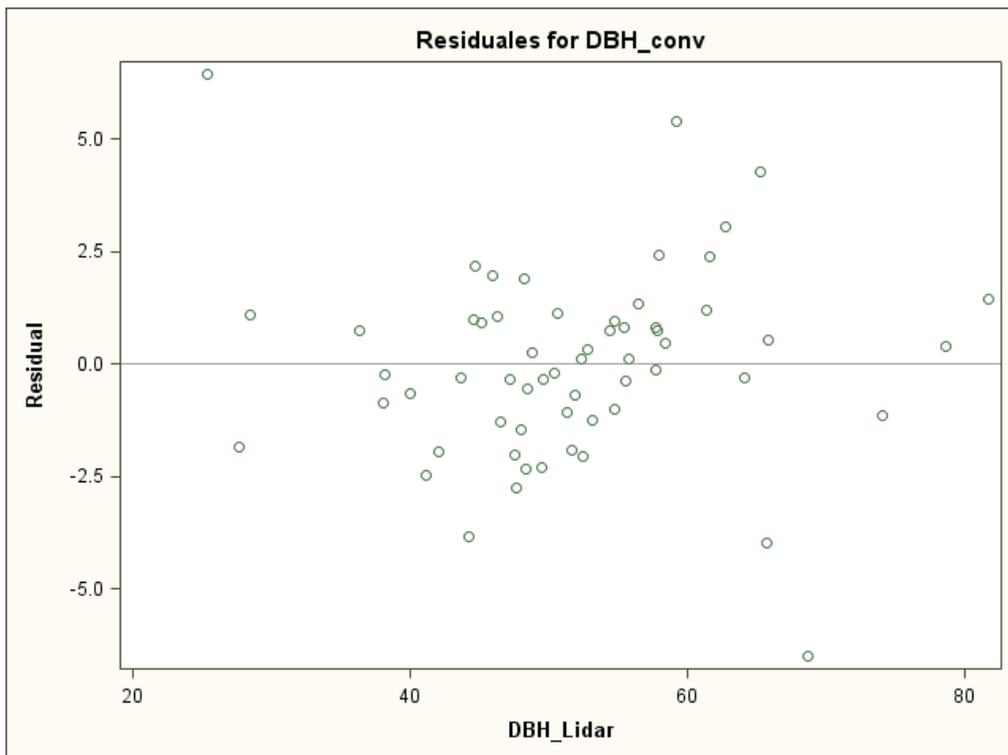
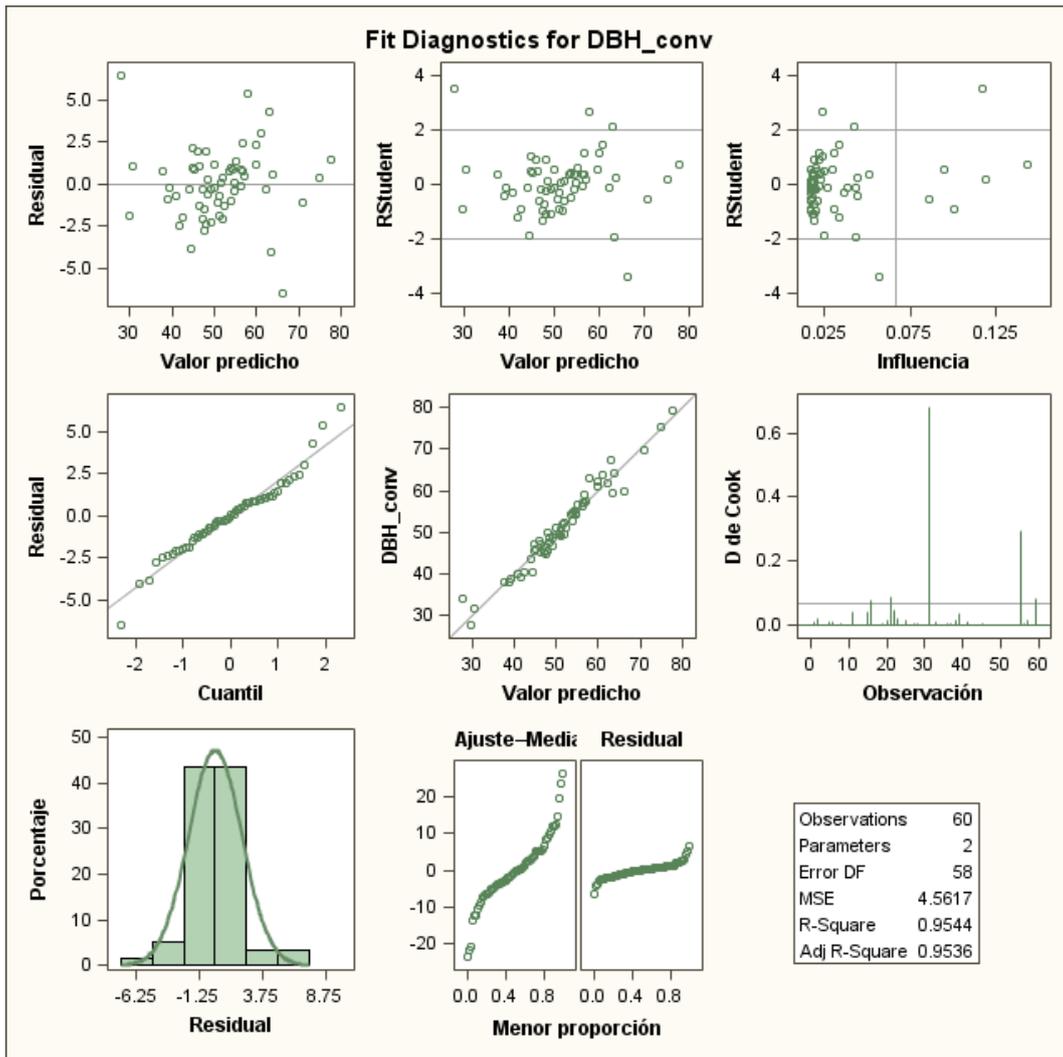
Raíz MSE	2.13582	R-cuadrado	0.9544
Media dependiente	51.27000	Adj R-Sq	0.9536
Coeff Var	4.16583		

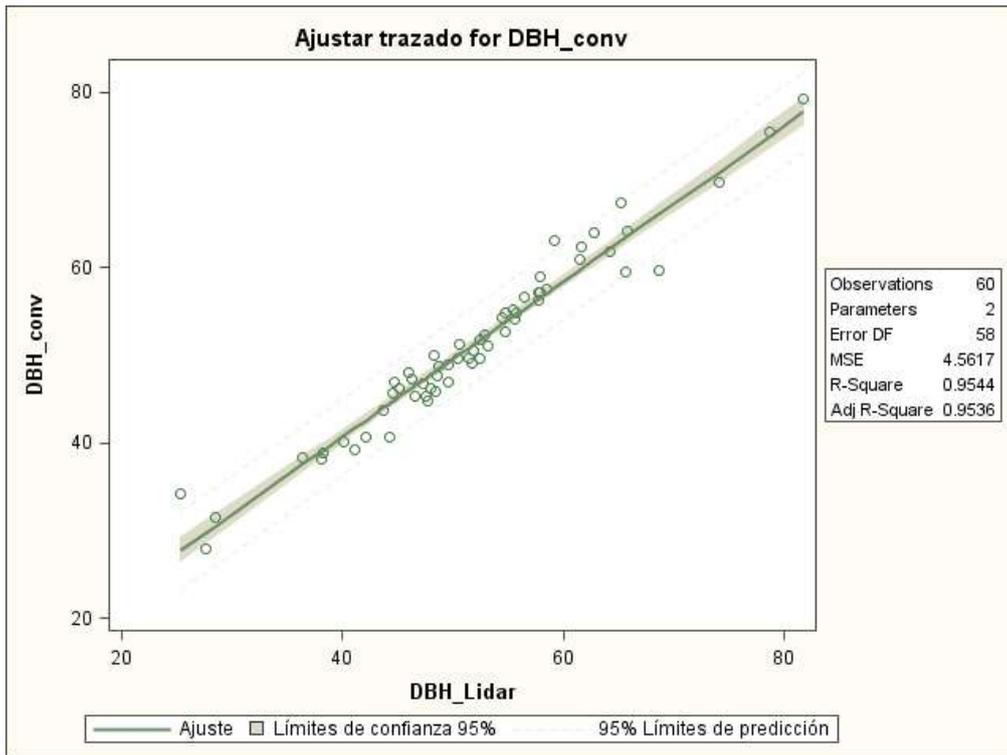
Estimadores de parámetros					
Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	5.22232	1.35064	3.87	0.0003
DBH_Lidar	1	0.88734	0.02548	34.83	<.0001

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: DBH_conv





Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 1 de test para variable dependiente DBH_conv				
Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	2	56.28373	12.34	<.0001
Denominador	58	4.56172		

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 2 de test para variable dependiente DBH_conv				
Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	1	89.19241	19.55	<.0001
Denominador	58	4.56172		

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)

Momentos			
N	60	Sumar pesos	60
Media	0	Observ suma	0
Desviación std	2.11764198	Varianza	4.48440757
Asimetría	0.17322004	Curtosis	2.0575549
SC no corregida	264.580047	SC corregida	264.580047
Coef. variación	.	Media error std	0.2733864

Medidas estadísticas básicas			
Ubicación		Variabilidad	
Media	0.00000	Desviación std	2.11764
Mediana	-0.00377	Varianza	4.48441
Moda	.	Rango	12.92175
		Rango intercuantil	2.20801

Tests para posición: $\mu_0=0$			
Test	Estadístico	P-valor	
T de Student	t	0	Pr > t 1.0000
Signo	M	0	Pr >= M 1.0000
Puntuación con signo	S	-8	Pr >= S 0.9536

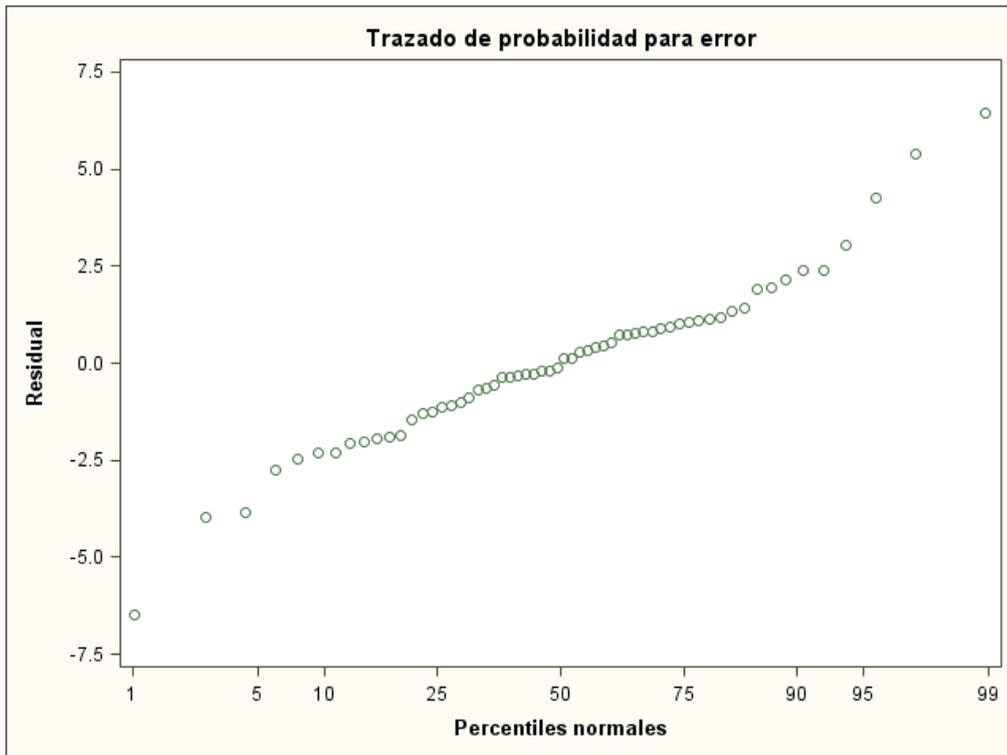
Tests para normalidad			
Test	Estadístico	P-valor	
Shapiro-Wilk	W	0.963266	Pr < W 0.0680
Kolmogorov-Smirnov	D	0.102922	Pr > D 0.1131
Cramer-von Mises	W-Sq	0.098887	Pr > W-Sq 0.1165
Anderson-Darling	A-Sq	0.682135	Pr > A-Sq 0.0752

Cuantiles (Definición 5)	
Cuantil	Estimador
100% Máx	6.43365548
99%	6.43365548
95%	3.66021400
90%	2.26565100
75% Q3	1.02033929
50% Mediana	-0.00376685
25% Q1	-1.18766723
10%	-2.31034472
5%	-3.29269677
1%	-6.48809251
0% Mín	-6.48809251

Observaciones extremas			
Inferior		Superior	
Valor	Observación	Valor	Observación
-6.48809	55	2.40079	25
-3.97608	59	3.04720	39
-3.83704	15	4.27322	21
-2.74836	20	5.39162	16
-2.48629	2	6.43366	31

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)



Obs	Parcela	arbol	DBH_cornv	DBH_Lidar	DBH_Conv2	DBH_lidar2	lnDBH_Cornv	lnDBH_lidar	predicho	error	t
1	2	22	63.1	59.15	3981.61	3498.72	4.14	4.08	57.70	5.39	2.68
2	2	49	34.15	25.35	1166.22	642.62	3.53	3.23	27.71	6.43	3.50
3	7	40	59.65	68.65	3558.12	4712.82	4.08	4.22	66.13	-6.48	-3.40

– DIAMETRO DE AREA BASIMETRICA

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: D_conv2

Número de observaciones leídas	61
Número de observaciones usadas	61

Análisis de la varianza					
Fuente	DF	Suma de cuadrados	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Modelo	1	76011254	76011254	297.69	<.0001
Error	59	15064987	255339		
Total corregido	60	91076242			

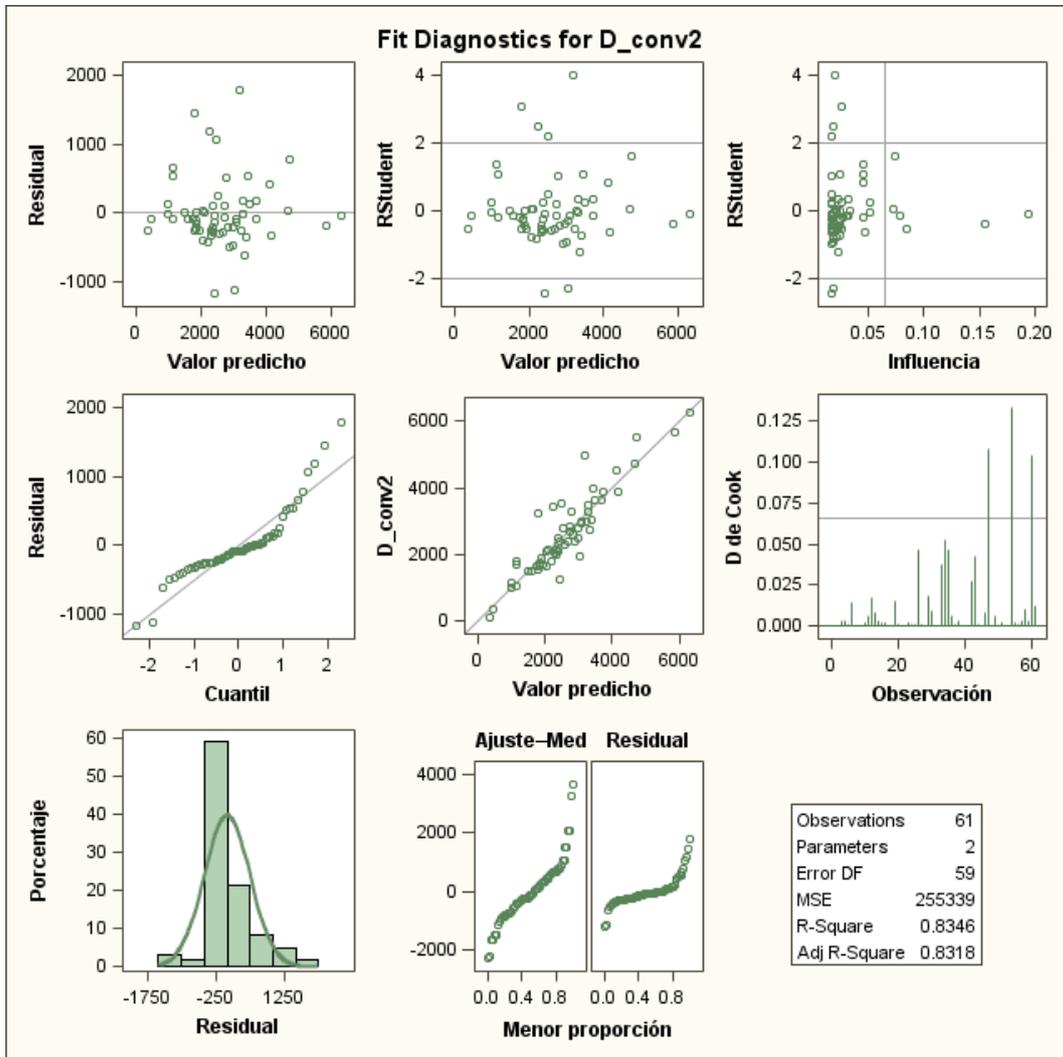
Raíz MSE	505.31057	R-cuadrado	0.8346
Media dependiente	2633.11447	Adj R-Sq	0.8318
Coeff Var	19.19060		

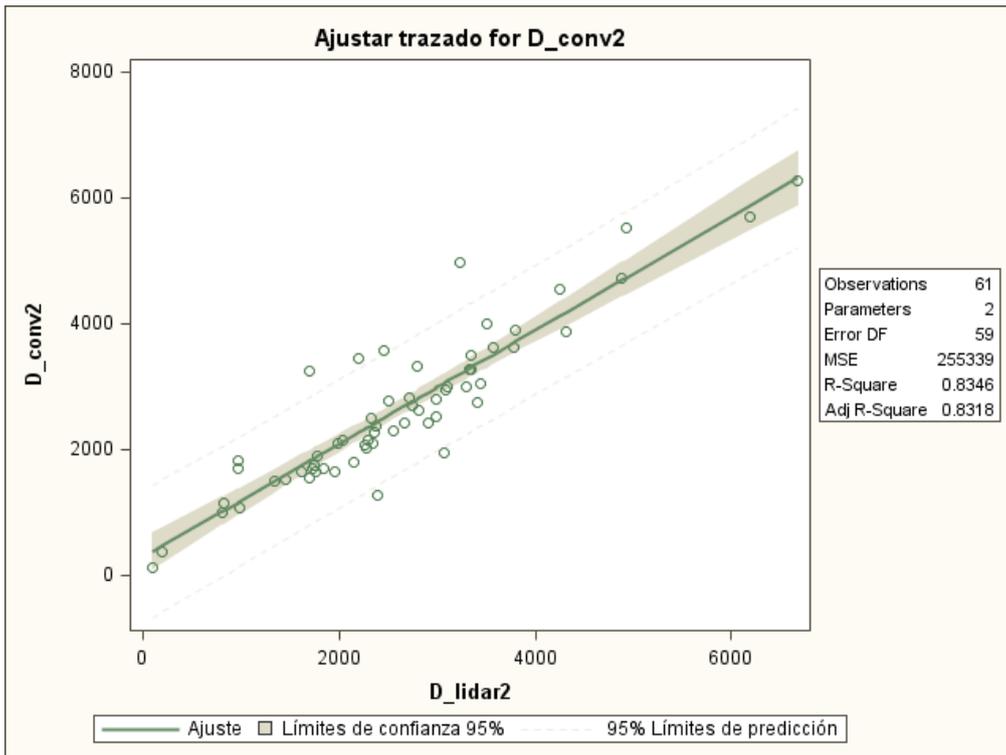
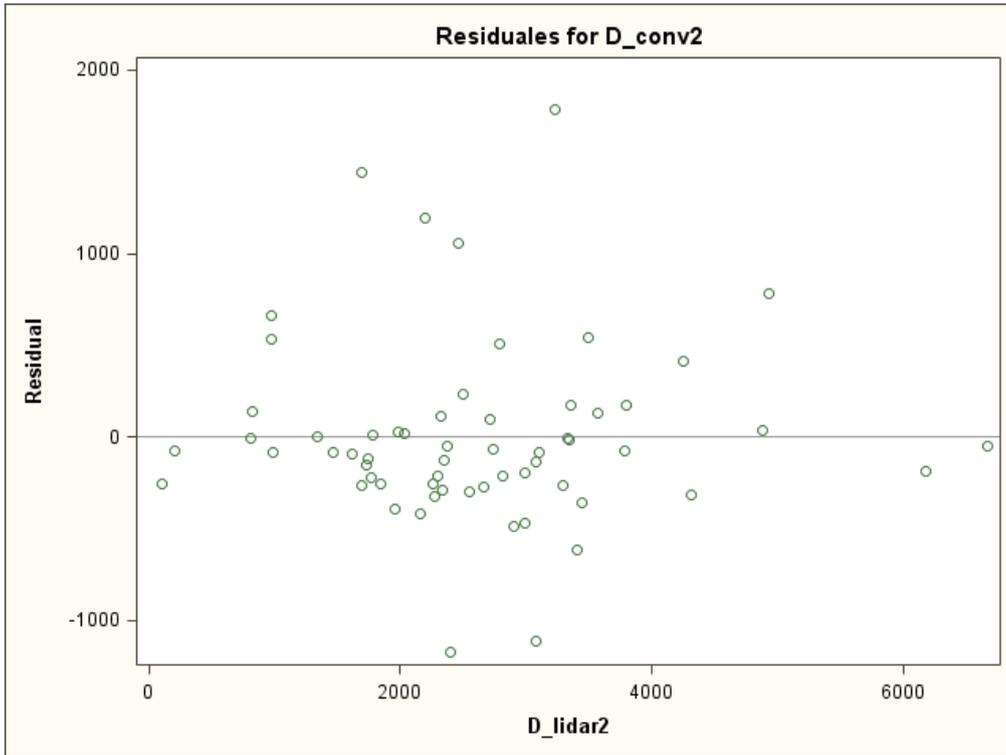
Estimadores de parámetros					
Variable	DF	Estimador del parámetro	Error estándar	Valor t	Pr > t
Intercept	1	272.17299	151.36163	1.80	0.0773
D_lidar2	1	0.90492	0.05245	17.25	<.0001

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Variable dependiente: D_conv2





Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 1 de test para variable dependiente D_conv2

Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	2	437317	1.71	0.1892
Denominador	59	255339		

Procedimiento REG

Modelo: MODEL1

Resultados 2 de test para variable dependiente D_conv2				
Fuente	DF	Cuadrado de la media	F-Valor	Pr > F
Numerador	1	839207	3.29	0.0749
Denominador	59	255339		

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)

Momentos			
N	61	Sumar pesos	61
Media	0	Observ suma	0
Desviación std	501.081954	Varianza	251083.125
Asimetría	1.23044905	Curtosis	3.38318805
SC no corregida	15064987.5	SC corregida	15064987.5
Coef. variación	.	Media error std	64.15697

Medidas estadísticas básicas			
Ubicación		Variabilidad	
Media	0.0000	Desviación std	501.08195
Mediana	-79.4537	Varianza	251083
Moda	.	Rango	2959
		Rango intercuantil	372.76713

Tests para posición: Mu0=0			
Test	Estadístico	P-valor	
T de Student	t	0	Pr > t 1.0000
Signo	M	-8.5	Pr >= M 0.0396
Puntuación con signo	S	-208.5	Pr >= S 0.1354

Tests para normalidad			
Test	Estadístico	P-valor	
Shapiro-Wilk	W	0.868797	Pr < W <0.0001
Kolmogorov-Smirnov	D	0.195527	Pr > D <0.0100
Cramer-von Mises	W-Sq	0.568694	Pr > W-Sq <0.0050
Anderson-Darling	A-Sq	3.035385	Pr > A-Sq <0.0050

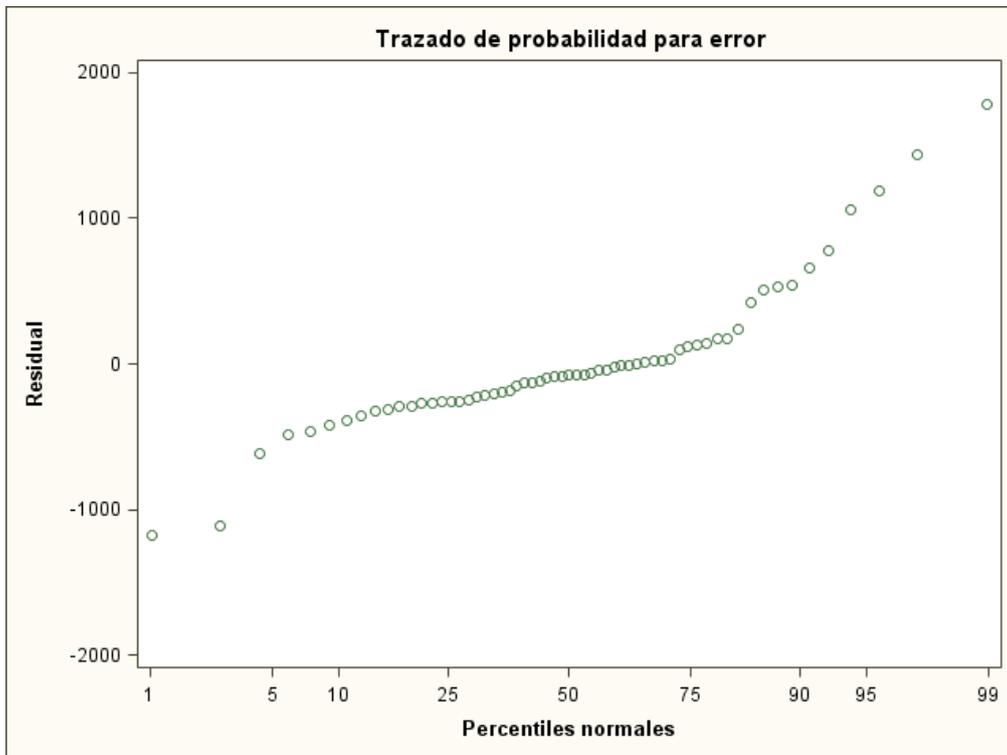
Cuantiles (Definición 5)	
Cuantil	Estimador
100% Máx	1785.6510
99%	1785.6510
95%	1059.7096
90%	543.3845
75% Q3	115.4983
50% Mediana	-79.4537
25% Q1	-257.2688
10%	-391.6340
5%	-490.3361
1%	-1173.0862

0% Mín	-1173.0862
---------------	------------

Observaciones extremas			
Inferior		Superior	
Valor	Observación	Valor	Observación
-1173.086	35	781.424	60
-1109.713	26	1059.710	33
-612.686	29	1193.167	34
-490.336	46	1438.814	47
-469.695	13	1785.651	54

Procedimiento UNIVARIATE

Variable: error (Residual)



Obs	parcela	Subarea	arbol	D_conv	D_lidar	D_conv2	D_lidar2	predicho	error	t
1	10	3	20	56.95	41.15	3243.30	1693.32	1804.49	1438.81	3.08554
2	10	4	15	70.55	56.80	4977.30	3226.24	3191.65	1785.65	3.99842

ANEJO 4

Informe del vuelo RPAS.

Agisoft PhotoScan

Processing Report
27 August 2014



Survey Data

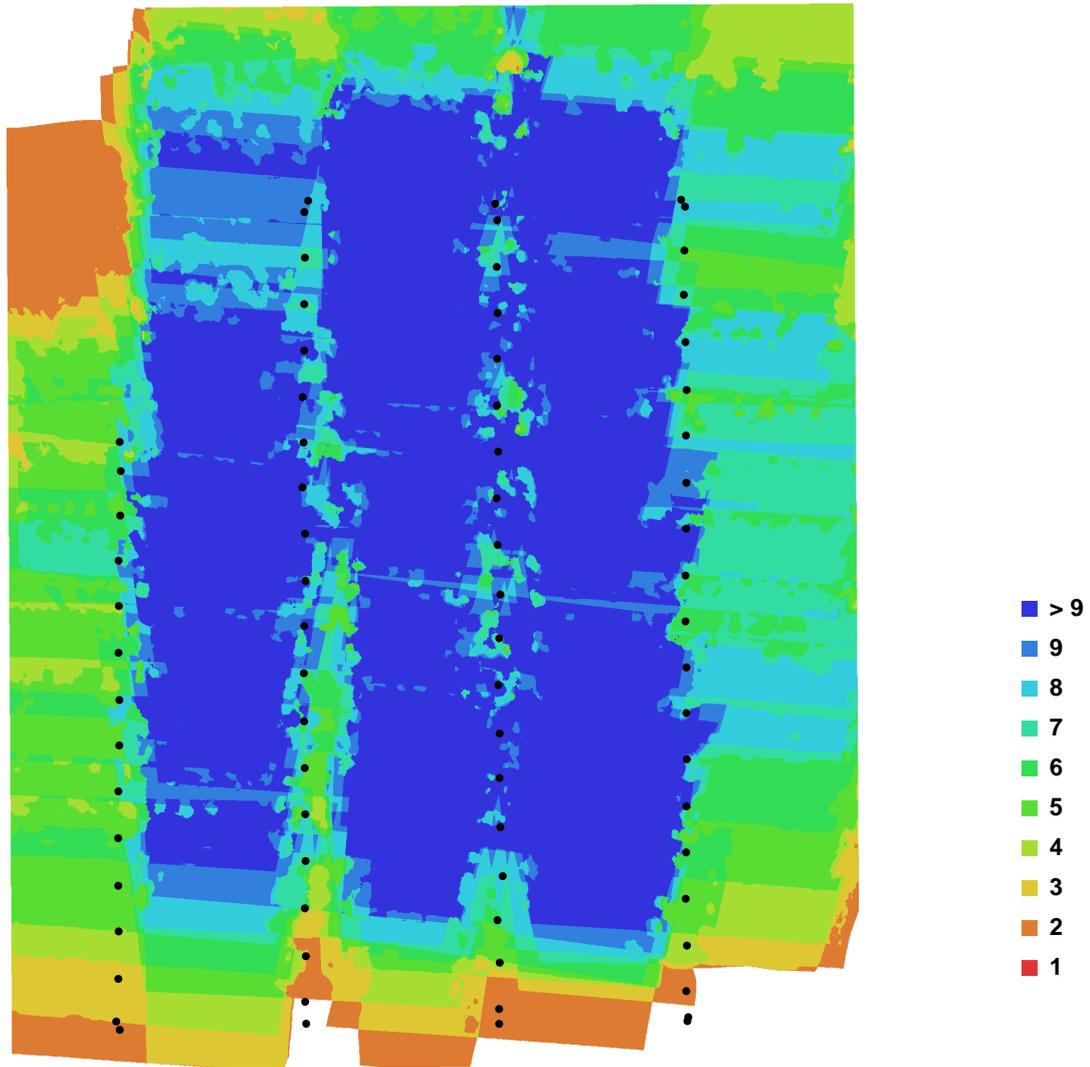


Fig. 1. Camera locations and image overlap.

Number of images:	76	Camera stations:	76
Flying altitude:	11.415 m	Tie-points:	442266
Ground resolution:	0.00268032 m/pix	Projections:	1057889
Coverage area:	0.000855637 sq km	Error:	0.22146 pix

Camera Model	Resolution	Focal Length	Pixel Size	Precalibrated
E-PM1 (17 mm)	4032 x 3024	17 mm	unknown	No

Table. 1. Cameras.

Digital Elevation Model

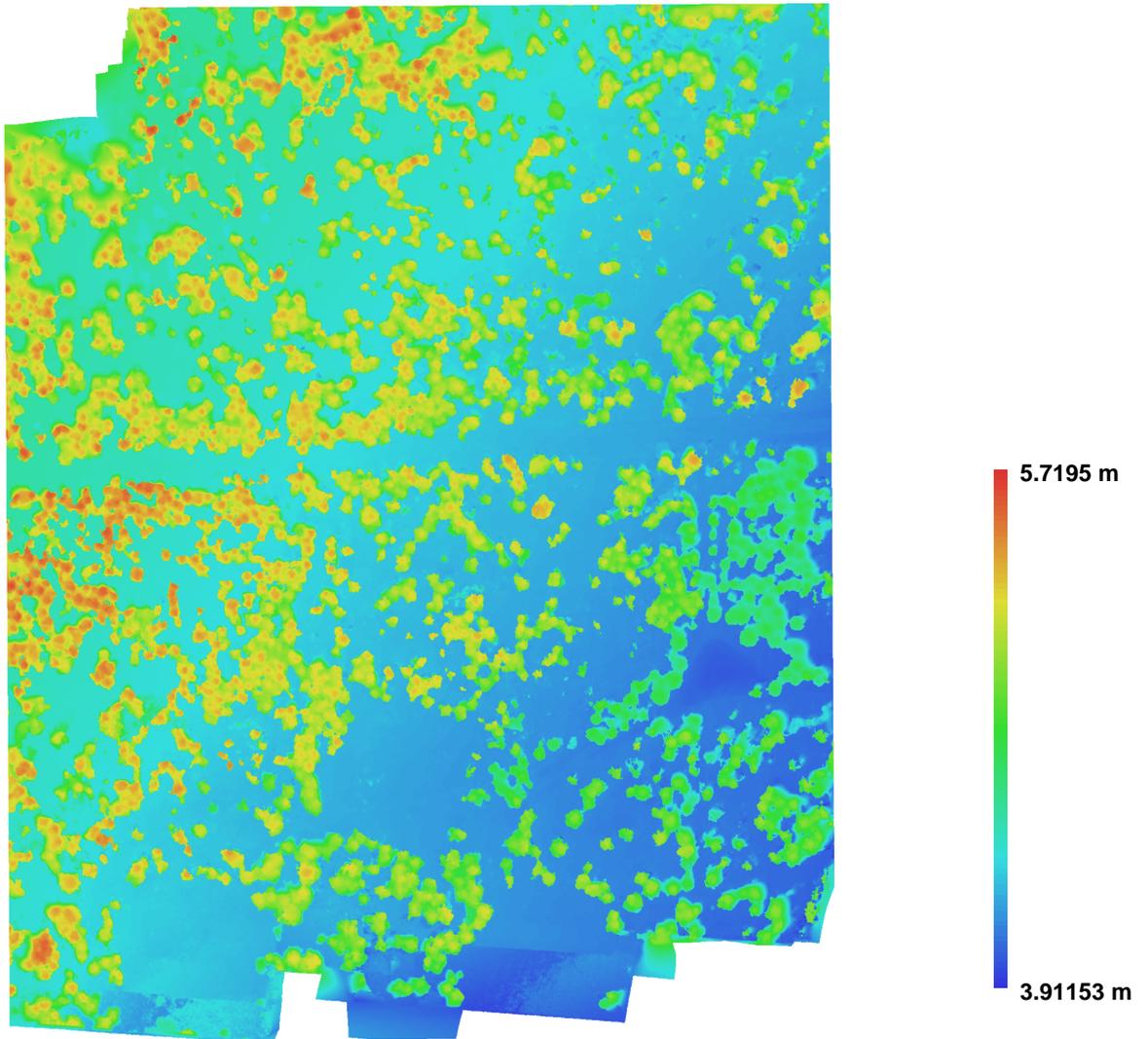


Fig. 2. Reconstructed digital elevation model.

Resolution: 0.0107213 m/pix
Point density: 8699.72 points per sq m

AGRADECIMIENTOS

Sobre estas líneas me gustaría expresar mi agradecimiento a todas aquellas personas que durante la realización del presente trabajo me han prestado su tiempo y ayuda.

Al Dr. Felipe Bravo Oviedo, tutor de este trabajo, por brindarme la oportunidad de realizar de este estudio bajo su supervisión y orientación que han sido de gran ayuda para mí.

Quiero agradecer enormemente al laboratorio de fotogrametría de la escuela de arquitectura, gracias al cual ha sido posible realizar este trabajo, a Juanjo, Cuki, Mónica, Artzai, Elena, Jorge, Paco, y muy especialmente a José Martínez Rubio, cotutor de este estudio, Luis García y David Marcos por su extraordinaria paciencia y buena voluntad. Sé que este trabajo no hubiera podido salir adelante sin vuestra ayuda. Gracias por hacer vuestros mis problemas y ayudarme a buscar una solución a esos estancamientos que más veces que menos se presentaban ante mí; por ayudarme con el lenguaje técnico y armaros de tanta paciencia para que yo pudiera comprender el funcionamiento de instrumentos que me resultaban tan nuevos; por mostrarme siempre la mejor de vuestras caras. Realmente este proyecto ha salido adelante gracias a vosotros y os lo debo todo, os estaré eternamente agradecida. Muchísimas muchísimas gracias.. Gracias a todos vosotros por haberme hecho sentir en el departamento como una más de vosotros desde el primer día y hacer así que el ir a trabajar allí haya sido todo un placer y no una obligación.

A mi familia, mi madre, mi padre, mi hermana y mi abuelo por su apoyo incondicional y la motivación que siempre me infundís no importa los km que nos separan, los siento muy cerca de mí.

A Jorge por todo tu amor y apoyo tanto activo como pasivo en todo lo que hago. Por sacar tiempo de donde realmente no tienes para aportarme diferentes puntos de vista y ayudarme así a tener más perspectiva en un tema tan diferente al tuyo y que aún así lo has tomado como propio.

A Cristóbal Ordoñez por ayudarme en los difíciles momentos que siempre son los comienzos de cualquier trabajo y hacer los trabajos de campo más amenos, así como tu gran disposición a cualquier duda o dificultad que te presentaba.

A Roberto San Martín, profesor del departamento de Estadística e Investigación Operativa de la E.T.I.I.A.A. Muchísimas gracias por involucrarte tanto en mi trabajo y dedicarme tantas horas incluso cuando ya era tiempo de estar de vacaciones. Al igual que la estadística, tu ayuda ha sido crucial, gracias por ser tan buen profesor.

A Irene Ruano por el gran apoyo y guía que ha supuesto para mí. Gracias por ser mi mentora y brindarme en todo momento el material de apoyo que has podido, tus opiniones, ideas y sobretodo tu experiencia.

Gracias María Gallo por tu orden que ha hecho posible poder disponer del material de campo necesario en cuestión de minutos. Gracias por ayudarme en las mediciones de campo y sufrir el calor de junio juntas.

Finalmente, a mis amigos, Juan Carlos, Jaime, Elena, Pedro, Marta y Rebeca por ayudarme a realizar las mediciones y compartir así conmigo grandes momentos de frío y calor en el monte. ¡Sin vosotros esas mediciones no habrían sido posibles! Y a todos aquellos que siempre me habéis estado dando palabras de ánimo. Muchas gracias.

