





# Planificación de vuelos y procesamiento de datos de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) en el monitoreo de plantaciones forestales

## Flight planning and data processing of unmanned aerial vehicles (UAVs) in forest plantation monitoring

Javier Hernández-Cole<sup>1</sup>  • Verónica Villalobos-Barquero<sup>1</sup>  • Mario Guevara-Bonilla<sup>1</sup>  • Edgar Ortiz-Malavasi<sup>1</sup> 

Recibido: 17/04/2023

Aceptado: 25/07/2023

### Abstract

The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for monitoring forest plantations is a potential useful tool but requires proper planning. Two softwares, four processing tools options and four flight parameters were evaluated to obtain orthomosaics in forest plantations located in Costa Rica. It was found that Pix4Dmapper<sup>®</sup> software requires less time for image processing, especially when using computers with at least 15 GB of RAM. The number of images to process per hectare can be lowered by reducing the spatial resolution of the images and using a flight plot (2D). The WebODM<sup>®</sup> software produced more processing failures, but the generated orthomosaics had fewer omission areas than those generated with Pix4Dmapper<sup>®</sup>. The proportion of processing failures is related to the number of images to be processed and the spatial resolution of the images. The best combinations to obtain orthomosaics were achieved using Pix4Dmapper<sup>®</sup> with flights at 120 meters, using a camera angle of 90° and a combination of overlap between images of 80 % frontal and 70 % lateral.

**Keywords:** Drones, Photogrammetric processing software, Pix4Dmapper, WebODM, orthomosaics.

1. Escuela de Ingeniería Forestal, Instituto Tecnológico de Costa Rica; Cartago, Costa Rica; [javhernandez@itcr.ac.cr](mailto:javhernandez@itcr.ac.cr); [villalobos@itcr.ac.cr](mailto:villalobos@itcr.ac.cr); [maguevara@itcr.ac.cr](mailto:maguevara@itcr.ac.cr); [eortiz@itcr.ac.cr](mailto:eortiz@itcr.ac.cr)

## Resumen

El uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTs) para el monitoreo de plantaciones forestales es una herramienta potencialmente útil, pero requiere una adecuada planificación. Se evaluaron dos tipos de software, cuatro opciones de procesamiento y cuatro parámetros de vuelo para obtener ortomosaicos en plantaciones forestales ubicadas en Costa Rica. Se encontró que el software Pix4Dmapper® requiere menos tiempo para el procesamiento de imágenes, especialmente cuando el computador utilizado tiene al menos 15 GB de memoria RAM. El número de imágenes a procesar por hectárea se puede disminuir reduciendo la resolución espacial de las imágenes y usando un trazado de vuelo (2D). El software WebODM® produjo más fallos en el procesamiento, pero los ortomosaicos generados tuvieron menos áreas con omisiones que los generados con Pix4Dmapper®. La proporción de fallos en el procesamiento está relacionada con la cantidad de imágenes a procesar y la resolución espacial de las mismas. Las mejores combinaciones para obtener ortomosaicos se obtuvieron usando Pix4Dmapper® con vuelos a 120 metros, empleando un ángulo de cámara de 90° y una combinación de traslape entre imágenes de 80 % frontal y 70 % lateral.

**Palabras clave:** Drones, Software de procesamiento fotogramétrico, Pix4Dmapper®, WebODM®, ortomosaicos.

## Introducción

Los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) también conocidos como drones presentan múltiples ventajas [1], [2]. Por ejemplo, se han descrito como plataformas seguras, ligeras, flexibles y automatizadas, capaces de obtener imágenes para muchas aplicaciones, son plataformas de bajo costo y presentan una alta eficiencia [3], [4], [5].

En el campo forestal los drones ofrecen la posibilidad de hacer una medición no invasiva y precisa de diversos atributos de los árboles [6]. Por ejemplo, Torresan et al. [7] mencionan que algunas de estas aplicaciones son: estimación de información dasométrica o clasificación de especies de árboles. Por otra parte, se puede utilizar para el estudio de claros en el dosel y patrones espaciales, tal como lo hizo [8]. Por último, también se han empleado para la detección de incendios forestales [9] y el monitoreo forestal [10].

En el mercado existen gran variedad de tipos de VANTs, desde los de juguete y de carreras, hasta los profesionales. Para actividades de monitoreo de plantaciones forestales se considera que los VANTs adecuados son los semiprofesionales, ya que su costo es

asequible para las empresas, tienen incorporado sistema de GNSS, sensores anti-choque, brújula digital, IMU, sistemas RTK, etc., lo que permite que puedan usarse para realizar vuelos programados.

Existen diferentes parámetros fotogramétricos para la programación de los vuelos de un VANT [11], [12]. Algunos de ellos son: altura de vuelo, traslape frontal y lateral, velocidad de vuelo, patrón de vuelo, orientación del dron, y “resolución espacial” (ground sample distance, GSD, por sus siglas en inglés), entre otras [13], [14]. Existen pocas investigaciones que proporcionen información confiable sobre cómo planificar las misiones de los drones en actividades de monitoreo forestal y es necesario desarrollar experimentos que permitan probar diferentes opciones de vuelo, ya que estas influyen en la calidad de los productos que se desean obtener [15], [16].

Durante los últimos años se ha realizado diferentes investigaciones que permitan determinar los parámetros de vuelo óptimos para diferentes aplicaciones. Por ejemplo, se ha realizado estudios para determinar los parámetros de vuelos óptimos para obtener variables de la estructura del bosque [17], para mapear las malezas en trigo a una edad corta [18], para generar el mejor modelo digital de superficie en un cultivo [19] y también para generar un modelo de altura de copas en un bosque ubicado en Bélgica [20].

Las aplicaciones de software con licencia más utilizadas son Agisoft-PhotoScan®, Pix4Dmapper® y Ensomosaic®, así como el software libre OpenDroneMap, Mic Mac y VisualSFM [21]. Todos estos softwares han sido utilizados para procesar imágenes obtenidas con un VANT y así obtener diferentes productos, tal como: ortomosaicos, modelos de elevación, y nubes de puntos, entre otros [22]-[29].

El objetivo principal de la investigación fue evaluar herramientas informáticas de procesamiento de imágenes, opciones de procesamiento y parámetros de planificación de vuelo óptimos incluyendo: altura de vuelo, combinación de traslape lateral y frontal, y diseño de trazado del vuelo para un adecuado monitoreo de plantaciones forestales utilizando un vehículo aéreo no tripulado (VANT) semiprofesional.

## Materiales y métodos

### Áreas de estudio y descripción de las plantaciones

Se realizaron vuelos en cinco plantaciones forestales (seleccionadas al azar) ubicadas en cuatro provincias de Costa Rica: Alajuela, Guanacaste, Heredia y Limón (figura 1). La temperatura promedio en estas plantaciones varía

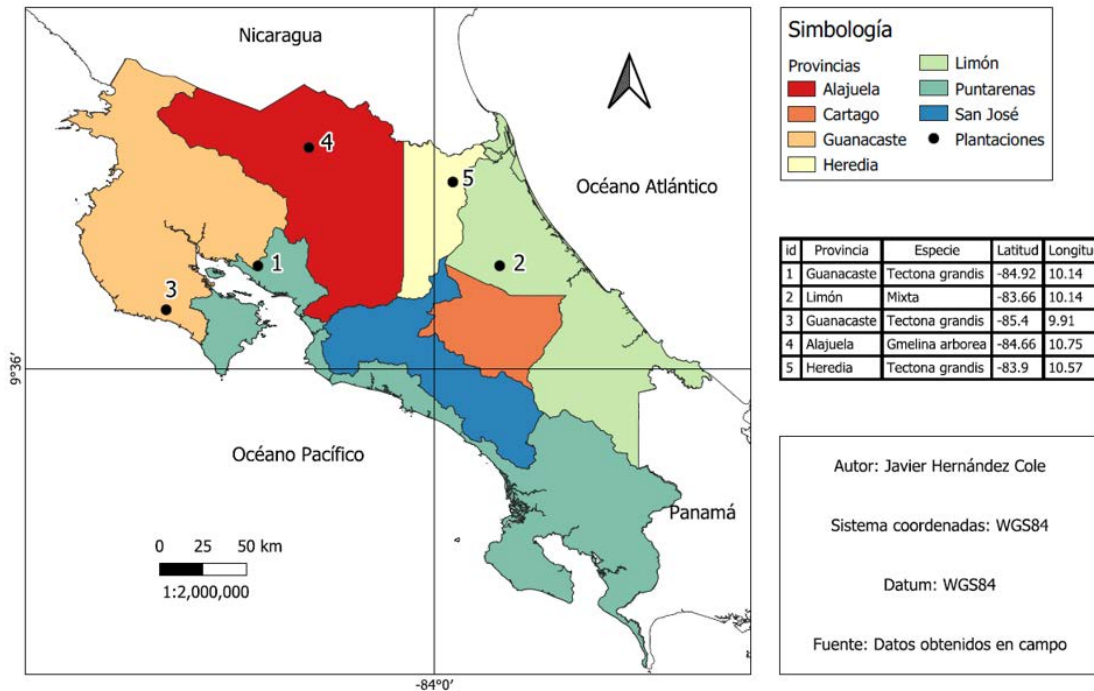


Figura 1. Ubicación de las plantaciones forestales del proyecto en Costa Rica.

Figure 1. Location of the project forest plantations in Costa Rica.

entre 19,0 y 27,0°C mientras que la precipitación anual ronda los 1500-4000 mm [30]. Tres de estas plantaciones corresponden a la especie *Tectona grandis* L., una de *Gmelina arborea* Roxb., y una plantación mixta la cual incluye especies como: *Hyeronima alchorneoides* L., *Schizolobium parahyba* S.F.Blake, *Eucalyptus degluta* Blume, *Tabebuia rosea* Bertol., *Vochysia ferruginea* Mart.

**Planificación y desarrollo del vuelo del VANT**

La programación de los vuelos del VANT se realizó utilizando la aplicación Pix4Dcapture® y siguiendo los pasos descritos por Tapia et al. [31]. Las variables que se configuraron en la aplicación fueron: la combinación de traslape lateral y frontal, la altura de vuelo (en m), el cual define el GSD de las imágenes, diseño de trazado de los vuelos y ángulo de la cámara. Es importante mencionar, que no se utilizó puntos de control terrestre o sistema RTK porque no estaba dentro de los objetivos del proyecto de investigación y además no se contaba con dicha tecnología. A continuación, en el cuadro 1 se muestra los diferentes parámetros de planificación de vuelo utilizados en cada una de las plantaciones.

Se utilizó un dron DJI WAV Phantom 4 Pro model (DJI, China) para realizar los vuelos en cada una de las plantaciones. Para esta etapa se posicionó al dron en el punto de partida definido en la etapa de planificación de

los vuelos y se procedió a iniciar el vuelo de este con ayuda de la aplicación de Pix4Dcapture® y un teléfono celular iOS. En cuanto al número de imágenes, este valor varió según el tamaño de cada plantación y los parámetros de vuelo indicados en el cuadro 1.

**Diseño experimental**

El diseño del experimento para determinar el mejor software y opciones de procesamiento fue un diseño factorial en el cual los factores fueron las opciones de procesamiento con cuatro niveles (cuadro 2) y los tipos de software de escritorio con dos niveles: Pix4Dmapper® y WebODM® (versión standard).

Con respecto a los parámetros de planificación de vuelo se realizó un diseño factorial considerando las siguientes tres variaciones: combinación de traslapes con tres niveles: 80x80, 70x70, y 70x80 donde el primer porcentaje corresponde al traslape lateral y el segundo al frontal. Además, incluye el factor diseño de trazado con dos niveles: 2D y 3D, el primero con un ángulo de cámara de 90 grados, y el segundo con un ángulo de 80 grados, y la altura de vuelo (en m) con tres niveles: 80, 90 y 120 metros. Con la combinación de estos dos últimos factores se obtuvieron imágenes con GSD de: 2,22; 2,49; 3,27; y 3,32 cm/píxel. Cabe resaltar que no se utilizaron todas las combinaciones posibles de factores y

**Cuadro 1.** Parámetros de planificación de vuelos utilizados y número de visitas realizadas a las diferentes plantaciones.

**Table 1.** Flight planning parameters used and number of visits to the different plantations

Plantación	Sitio	Especie	Cantidad de vuelos realizados	Diseño de trazado1	GSD (cm/píxel)	Altura de vuelo (m)	Porcentaje de traslape (%)
1	Abangares	<i>Tectona grandis</i>	12	2D, 3D	2,22; 2,49; 3,27; 3,32	80, 90, 120	70-70 %
							80-80 %
							70-80 %
2	Pocora	Mixta	12	2D, 3D	2,22; 2,49; 3,27; 3,32	80, 90, 120	70-70 %
							80-80 %
							70-80 %
3	Hojancha	<i>Tectona grandis</i>	8	2D, 3D	2,22; 2,49; 3,27; 3,32	80, 90, 120	70-70 %
							80-80 %
							70-80 %
4	Santa Rita	<i>Gmelina arborea</i>	13	2D, 3D	2,22; 2,49; 3,27; 3,32	80, 90, 120	70-70 %
							80-80 %
							70-80 %
5	Sarapiquí	<i>Tectona grandis</i>	8	2D, 3D	2,22; 2,49; 3,27; 3,32	80, 90, 120	70-70 %
							80-80 %
							70-80 %

Diseño de trazado 2D corresponde la configuración en que el VANT vuela el área de la plantación una única vez, mientras que diseño de trazado 3D indica que el VANT vuela el área dos veces siguiendo rumbos perpendiculares entre sí.

además se realizaron varios vuelos utilizando las mismas variaciones, pero en diferente época del año.

Para determinar las mejores opciones de procesamiento y de diseño de vuelo se evaluaron como variables de respuesta: tiempo de procesamiento por hectárea, porcentaje de área omitida en el ortomosaico, el cual se refiere a pocos datos en la nube densa, y por último fallo en el procesamiento (0 y 1), es decir, 0 si el software utilizado no pudo ejecutar el procesamiento y 1 si tuvo éxito en la realización del mismo.

### Procesamiento y análisis de la información

El procesamiento de la información obtenida se realizó con ayuda de los softwares Pix4Dmapper® y WebODM®, utilizando las opciones de procesamiento descritas anteriormente (cuadro 2). Se utilizó el procedimiento descrito en el manual desarrollado por Tapia et al. [31], el cual especifica la forma en que se realiza el procesamiento de datos provenientes de un VANT para los dos softwares a utilizar.

Una vez procesada la información, se realizaron análisis para verificar la normalidad de los datos obtenidos, y dado que no había un comportamiento normal en las muestras se recurrió al uso de pruebas no paramétricas.

Las variables de respuesta tiempo de procesamiento (horas/hectárea) y porcentaje de área omitida en el ortomosaico se analizaron usando una prueba no paramétrica Kruskal Wallis con comparación de medianas, así como análisis gráficos para visualizar el comportamiento de estas variables con respecto a la cantidad de imágenes. La variable fallo de procesamiento se analizó usando una regresión logística usando dos modelos. El primero considerando los factores software, GSD, combinación de traslape (%) y cantidad de imágenes; y el segundo modelo incluyó los factores opción de procesamiento, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes. Por último, también se realizaron análisis gráficos y cuadros para visualizar la cantidad de fallos en el procesamiento según software, opción de procesamiento, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes. Todos los análisis se realizaron con ayuda de los programas estadísticos Infostat®, Minitab® y Excel®.

## Resultados y discusión

### Variable de respuesta tiempo de procesamiento

El tiempo de procesamiento (horas/hectárea) varió según el tipo de software existiendo diferencias significativas ( $P < 0,05$ ). En la Figura 2a, se puede observar que el software Pix4Dmapper® fue el que obtuvo una menor

**Cuadro 2.** Opciones de procesamiento utilizadas en cada software para el procesamiento de las imágenes.

**Table 2.** Processing options used in each software for image processing.

Opción	Tipo de procesamiento	Computadora	RAM utilizado	Unidad central de procesamiento (cantidad de núcleos)	Procesador	Tarjeta gráfica (modelo)
1	A	Asus X556UQK	8 Gb	3	Icore 5 7th Gen	NVIDIA GEFORCE 940 Mx.
2	B	Asus X556UQK	8 Gb	3	Icore 5 7th Gen	NVIDIA GEFORCE 940 Mx.
3	C	Asus VivoBook 15 X512F	8 Gb	8	Icore 5 8th Gen	NVIDIA GEFORCE 240 Mx.
4	C	Lenovo 82B5	15 Gb	12	Icore 5 8th Gen	NVIDIA GTX 1650 Ti

A: DSM+DTM + algoritmo sift, B: DSM+DTM + algoritmo hahog, C: Template 3D maps + habilitación DTM. Con la opción 1 se procesaron 9 sitios y 56 vuelos. Con la opción 2 se procesaron 9 sitios y 56 vuelos. Con la opción 3 se procesaron 4 sitios y 28 vuelos. Con la opción 4 se procesaron 5 sitios y 28 vuelos.

cantidad de tiempo con respecto a WebODM®. Estos resultados coinciden con varias investigaciones, en las cuales el tiempo de procesamiento varío según el tipo de programa utilizado, así como que Pix4Dmapper® procesó las imágenes en una menor cantidad de tiempo [17], [32], [33], [34].

En cuanto a las opciones de procesamiento, se observan diferencias estadísticas significativas entre algunas opciones ( $P < 0,05$ ) (Figura 2B), siendo la No. 4 la que obtuvo un menor tiempo de procesamiento por hectárea, opción que se diferencia de las otras por la cantidad de memoria RAM disponible en la computadora. Esto concuerda con otras investigaciones donde se encontró que el tiempo de procesamiento fue influenciado por el tipo de computadora a utilizar y/o la opción de procesamiento del software [17], [35].

Al evaluar el tiempo de procesamiento (hrs/ha) según el GSD utilizado, se puede observar que hay evidencia de diferencias significativas según la prueba de Kruskal-Wallis ( $P < 0,05$ ) (Figura 2c). El vuelo empleado con un diseño de trazado 2D, a 120 metros de altura fue el que obtuvo un menor tiempo de procesamiento, seguido por el vuelo realizado a 120 metros de altura utilizando un trazado 3D, que corresponde a un GSD de 3,32 cm/píxel. Con respecto a los porcentajes de traslape utilizados en la captura de imágenes con el VANT, no se encontró evidencia de diferencias significativas ( $P > 0,05$ ). Estos resultados son congruentes con una investigación realizada por Uzaktan et al. [36] en la cual obtuvo que para el software Pix4Dmapper® el tiempo de procesamiento fue menor cuando se voló a una altura mayor, lo cual genera vuelos con menor cantidad de imágenes y de menor resolución espacial. Por otra parte, Nam-Bui et al. [37] indican que el tiempo de procesamiento es inversamente proporcional a la altura de vuelo. Es decir, a mayor altura de vuelo y mayor GSD se obtienen una

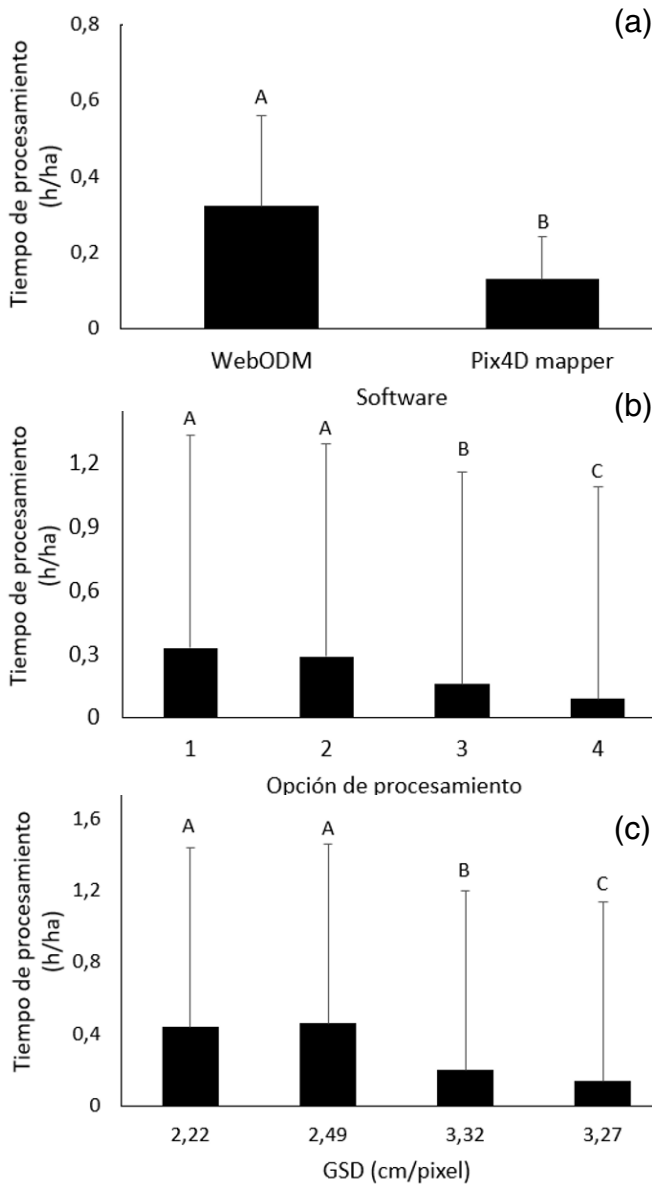
menor cantidad de imágenes, lo cual deriva en un menor tiempo de procesamiento.

Por otra parte, los resultados obtenidos de las diferentes interacciones de factores concuerdan con los obtenidos en la Figura 2. Para obtener una menor cantidad de tiempo de procesamiento es necesario procesar las imágenes con Pix4Dmapper®, la opción de procesamiento 4, y configuraciones de vuelo que tiendan a disminuir el número de imágenes a procesar, tal como: una altura de vuelo de 120 m, menor resolución (3,27 cm/píxel), un trazado 2D, y combinaciones de traslape lateral 70 o 80 %, y frontal: 70 o 80 %.

En la Figura 3, es posible apreciar la relación que existe entre el tiempo de procesamiento (horas) y la cantidad de imágenes por hectárea. En la mayoría de los casos, especialmente con las opciones de procesamiento 1 y 2, conforme aumenta la cantidad de imágenes también aumenta el tiempo requerido en el procesamiento. Esto coincide con varias investigaciones en donde el tiempo de procesamiento fue menor cuando se procesaban una menor cantidad de imágenes [32], [38].

**Variable de respuesta porcentaje de área omitida en el ortomosaico**

Se encontró que con el software Pix4Dmapper® se obtuvieron una mayor cantidad de áreas omitidas en el procesamiento de las imágenes tomadas con el VANT ( $P < 0,05$ ). Por otra parte, se halló diferencias entre las opciones de procesamiento al 94 % de confiabilidad ( $P = 0,06$ ) (Figura 4A). Esto puede ser explicado por las diferencias que se pueden presentar entre softwares en cuanto a calidad y productos a obtener [39]. Sin embargo, en diversas investigaciones se menciona que la calidad del ortomosaico, tal como presencia de áreas omitidas,

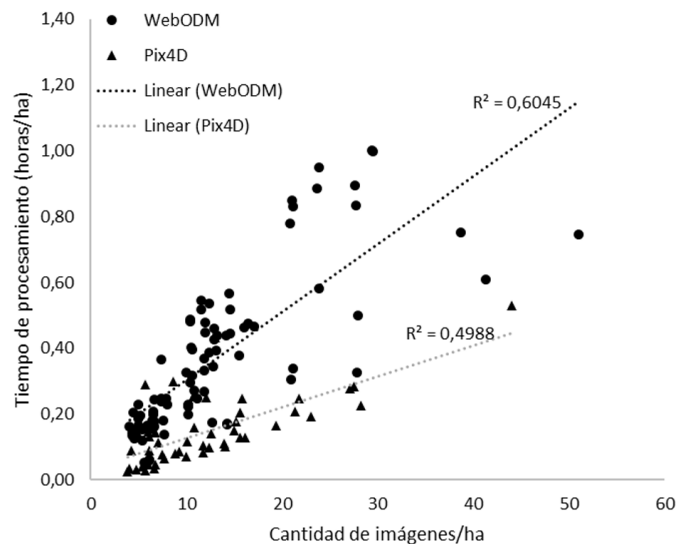


**Figura 2.** Diferencias en el tiempo de procesamiento según el tipo de software, opciones de procesamiento y GSD (cm/píxel). Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.

**Figure 2.** Differences in processing time according to software type, processing options and GSD (cm/pixel). Note: the error bars in the figures correspond to the standard deviation.

puede estar más afectado por los parámetros de vuelo que se vayan a utilizar [40], [41].

La prueba de Kruskal-Wallis muestra la existencia de diferencias significativas según el porcentaje de traslape al evaluar el área omitida en el ortomosaico ( $P < 0,05$ ). Es posible notar que la combinación de traslape (lateral: 70 % y frontal: 80 %) posee un porcentaje menor que las demás (Figura 4b). Asimismo, a la hora de evaluar el GSD (cm/píxel) no fue posible encontrar diferencias



**Figura 3.** Relación entre el tiempo de procesamiento (horas/ha) y la cantidad de imágenes/hectárea de cada vuelo según el tipo de software utilizado.

**Figure 3.** Relationship between processing time (hours/ha) and number of images/hectare of each flight according to the type of software used.

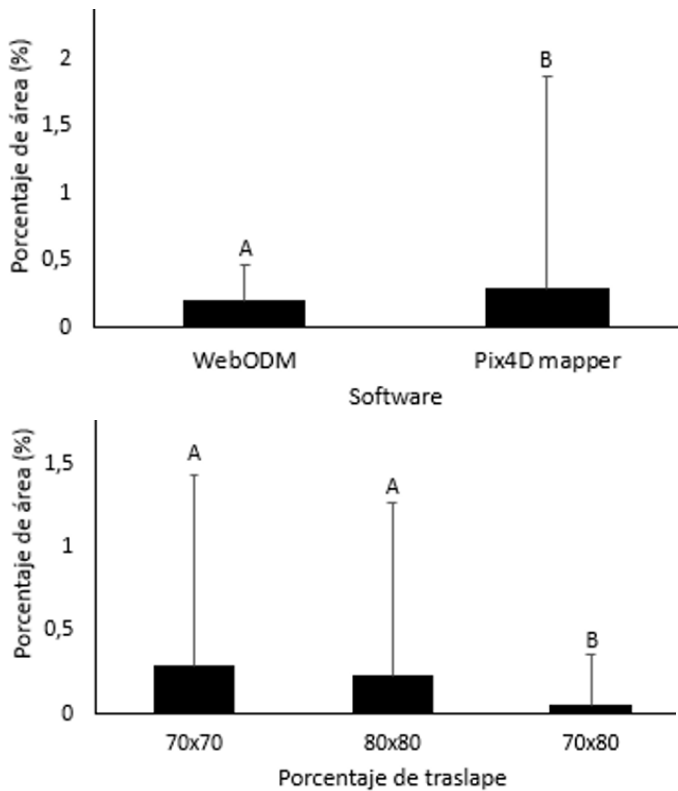
significativas ( $P > 0,05$ ). Este resultado contrasta con lo obtenido en otra investigación [41], donde menciona que a mayor porcentaje de traslape, las zonas con área omitida en el ortomosaico son menores. Por otra parte, Fraser y Congalton [40] indican que un bajo porcentaje de traslape resulta en una mayor cantidad de huecos en el ortomosaico, tendencia que solo se cumple entre las combinaciones (70/70 % y 70/80 %).

En cuanto a los resultados obtenidos en las interacciones de factores, estos indicaron que para obtener una menor cantidad de porcentaje de vacíos de información es necesario realizar el procesamiento con el software WebODM®, las opciones de procesamiento 1 o 2, una baja resolución (3,27 cm/píxel), un diseño de trazado 2D, y la combinación de traslape lateral: 70 % y frontal: 80 %.

### Variable de respuesta fallo en el procesamiento

Los resultados más importantes obtenidos en la regresión logística, fue que el factor cantidad de imágenes tiene una relación estadísticamente significativa con el fallo en el procesamiento para el modelo 1 y 2 ( $P < 0,05$ ).

Por otra parte, en la Figura 5, es posible visualizar que el software WebODM® presentó mayor cantidad de porcentaje de fallos que Pix4Dmapper®. Con respecto a las opciones de procesamiento, se presentó una mayor cantidad de fallos en las opciones 1 y 2 en comparación



**Figura 4.** Porcentaje de área omitida según el software de procesamiento y combinación de traslape utilizada en el vuelo del VANT. Nota: las barras de error de las figuras corresponden a la desviación estándar.

**Figure 4.** Percentage of omitted area according to the processing software and overlap combination used in the UAV flight. Note: the error bars in the figures correspond to the standard deviation.

con la 3, mientras que la opción 4 no presentó fallas en el procesamiento de las imágenes. A la hora de procesar de 100 a 500 imágenes utilizando un equipo Windows es recomendable poseer los siguientes componentes: versión Windows 10 (64 bits), una CPU (quad core o hexa core Intel i9/ Threadripper/ Ryzen 9), una tarjeta gráfica GeForce GTX, un disco duro en estado sólido (SSD), una memoria RAM de 16 GB y un espacio de almacenamiento libre de 30 a 100 GB [42], [43]. En esta investigación, la mayoría de estos requerimientos recomendados, fueron alcanzados por la opción de procesamiento 4, la cual no presentó fallas en el procesamiento de las imágenes.

En el cuadro 4, se observa que se disminuye la cantidad de fallos cuando se disminuye la cantidad de imágenes presente en cada GSD. Por ejemplo, el GSD que presenta una mayor cantidad de imágenes (2,22 cm/píxel) fue el que obtuvo el mayor porcentaje de fallos en el procesamiento. En la presente investigación, las opciones de procesamiento que presentaron fallos fueron las que no

**Cuadro 3.** Valor de significancia obtenidos en la regresión logística para la variable fallo en el procesamiento (0 y 1) de las imágenes.

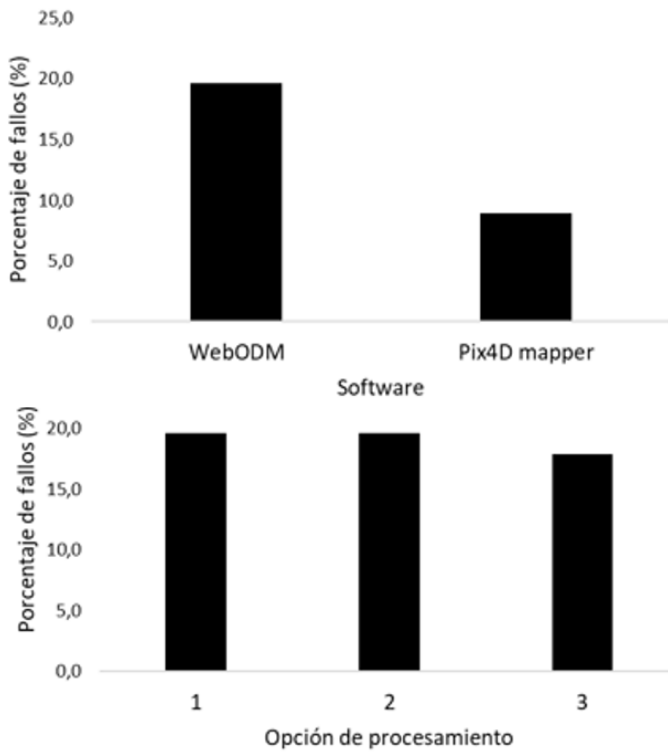
**Table 3.** Significance values obtained in the logistic regression for the variable failure in image processing (0 and 1).

Modelo	Factores considerados en el modelo	Factor	P-valor
1	Software, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes	Software	0,02
		GSD	0,39
		Combinación traslape	0,53
		Cantidad de imágenes	0,01
2	Opción de procesamiento, GSD, combinación de traslape y cantidad de imágenes	Opción de procesamiento	0,95
		GSD	0,33
		Combinación	0,61
		Traslape	0,01
		Cantidad de imágenes	

poseían la mayoría de requisitos recomendados (opciones 1, 2 y 3), por lo tanto, al procesar más imágenes es más probable que no puedan llevar a cabo el procesamiento de los datos. Por lo tanto, es recomendable seleccionar un GSD que permita minimizar la cantidad de imágenes (3.27 cm/píxel), el cual se obtiene al volar a una altura de 120 metros y utilizando un diseño de trazado 2D [42]-[46].

Al analizar el cuadro 5, es posible apreciar que las combinaciones de traslape lateral: 80 % y frontal: 80 %, presenta una mayor cantidad de fallos en el procesamiento en comparación con el porcentaje de traslape 70x70. Con respecto a la combinación 70x80 no se obtuvieron fallas en el procesamiento de las imágenes. Seifert et al. [47] mencionan que el porcentaje de traslape es uno de los factores más importantes a la hora de tener éxito en el procesamiento de imágenes provenientes de un VANT. Por lo tanto, si el usuario está utilizando una computadora con pocos de los requisitos recomendados, es mejor utilizar una combinación de traslape 70x80 debido a que esto permitirá que se tenga una probabilidad más baja de obtener un fallo en el procesamiento.

El cuadro 6 muestra que al procesar de 0 a 125 imágenes se obtuvo un porcentaje de fallos inferior al 20 %, mientras que al aumentar la cantidad de imágenes a procesar el porcentaje de fallos fue superior al 40 %. Estos resultados sugieren una tendencia lineal la cual explica que, a mayor cantidad de imágenes, es más probable obtener una falla en el procesamiento de los datos. Esto concuerda con los resultados de la regresión logística (cuadro 3) en el cuál es posible observar que la cantidad de imágenes posee una



**Figura 5.** Porcentaje de fallos en el procesamiento según el tipo de software y opción de procesamiento.

**Figure 5.** Percentage of processing failures according to software type and processing option.

**Cuadro 4.** Porcentaje de fallos en el procesamiento según el GSD, software y opción de procesamiento.

**Table 4.** Percentage of processing failures according to GSD, software and processing option.

GSD	Porcentaje de fallos (WebODM® + OP 1)	Porcentaje de fallos (WebODM® + OP 2)	Porcentaje de fallos (Pix4Dmapper® + OP 3)
2,22	30,00	30,00	33,33
2,49	25,00	25,00	25,00
3,32	20,00	20,00	12,50
3,27	11,11	16,67	0,00

OP 1: Opción de procesamiento 1; OP 2: Opción de procesamiento 2; OP 3: Opción de procesamiento 3

relación estadísticamente significativa con esta variable de respuesta, por lo tanto, es recomendable seleccionar opciones de configuración de vuelo que permitan obtener una menor cantidad de imágenes, especialmente si no se tiene una computadora con la configuración óptima.

**Cuadro 5.** Porcentaje de fallos en el procesamiento según el porcentaje de traslape, software y opción de procesamiento.

**Table 5.** Percentage of processing failures by percentage of overlap, software and processing option.

Porcentaje de traslape	Porcentaje de fallos (WebODM® + OP 1)	Porcentaje de fallos (WebODM® + OP 2)	Porcentaje de fallos (Pix4Dmapper® + OP 3)
70x70	9,09	13,64	0,00
80x80	32,14	28,57	35,17
70x80	0,00	0,00	0,00

OP 1: Opción de procesamiento 1; OP 2: Opción de procesamiento 2; OP 3: Opción de procesamiento 3

**Cuadro 6.** Porcentaje de fallos en el procesamiento según la cantidad de imágenes, software y opción de procesamiento.

**Table 6.** Percentage of processing failures according to number of images, software and processing option.

Cantidad de imágenes	Porcentaje de fallos (WebODM® + OP 1)	Porcentaje de fallos (WebODM® + OP 2)	Porcentaje de fallos (Pix4Dmapper® + OP 3)
0-125	10,00	13,33	0,00
126-251	17,65	11,76	5,26
252-377	55,56	55,56	44,44

OP 1: Opción de procesamiento 1; OP 2: Opción de procesamiento 2; OP 3: Opción de procesamiento 3

## Conclusiones

El software Pix4Dmapper® procesó las imágenes en una menor cantidad de tiempo y obtuvo menos fallos de procesamiento. Sin embargo, es posible utilizar un software económicamente más accesible como WebODM® si se desea obtener menos áreas con vacíos de información dentro del ortomosaico, pero será necesario mejorar la capacidad de procesamiento de la computadora a utilizar. Los mejores parámetros de configuración de vuelos para realizar el monitoreo de plantaciones forestales son los vuelos utilizando una altura de 120 metros, un diseño de trazado 2D, para obtener una resolución espacial cercana 3,27 cm/píxel, y usar una combinación de traslapes lateral 70 % y frontal 80 %. Estos parámetros permiten obtener ortomosaicos de buena calidad, con menor tiempo y menor probabilidad de fallas en el procesamiento.

## Referencias

[1] Tiberiu Paul Banu, Gheorghe Florian Borlea, & Constantin Banu. The "Use of Drones in Forestry". Journal of



- Environmental Science and Engineering B, 5(11), 557–562, 2016.
- [2] Um, J.-S. *Drones as Cyber-Physical Systems*, 2019.
- [3] Nex, F., & Remondino, F. “UAV for 3D mapping applications: A review”. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15, 2014.
- [4] Shahbazi, M., Théau, J., & Ménard, P. “Recent applications of unmanned aerial imagery in natural resource management”. *GIScience and Remote Sensing*, 51(4), 339–365, 2014.
- [5] Wang, Y., Bai, P., Liang, X., Wang, W., Zhang, J., & Fu, Q. “Reconnaissance Mission Conducted by UAV Swarms Based on Distributed PSO Path Planning Algorithms”. *IEEE Access*, 7(July), 105086–105099, 2019.
- [6] Berie, H. T., & Burud, I. “Application of unmanned aerial vehicles in earth resources monitoring: Focus on evaluating potentials for forest monitoring in Ethiopia”. *European Journal of Remote Sensing*, 51(1), 326–335, 2018.
- [7] Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S. F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., & Wallace, L. “Forestry applications of UAVs in Europe: a review”. *International Journal of Remote Sensing*, 38(8–10), 2427–2447, 2017.
- [8] Liu, F., Yang, Z. gao, & Zhang, G. “Canopy gap characteristics and spatial patterns in a subtropical forest of South China after ice storm damage”. *Journal of Mountain Science*, 17(8), 1942–1958, 2020.
- [9] Yuan, C., Liu, Z., & Zhang, Y. “Aerial Images-Based Forest Fire Detection for Firefighting Using Optical Remote Sensing Techniques and Unmanned Aerial Vehicles”. *Journal of Intelligent and Robotic Systems: Theory and Applications*, 88(2–4), 635–654, 2017.
- [10] Sankey, T., Donager, J., McVay, J., & Sankey, J. B. “UAV lidar and hyperspectral fusion for forest monitoring in the southwestern USA”. *Remote Sensing of Environment*, 195, 30–43, 2017.
- [11] Hugenholtz, C. H., Whitehead, K., Brown, O. W., Barchyn, T. E., Moorman, B. J., LeClair, A., Riddell, K., & Hamilton, T. “Geomorphological mapping with a small unmanned aircraft system (sUAS): Feature detection and accuracy assessment of a photogrammetrically-derived digital terrain model”. *Geomorphology*, 194, 16–24, 2013.
- [12] Frey, J., Kovach, K., Stemmler, S., & Koch, B. “UAV photogrammetry of forests as a vulnerable process. A sensitivity analysis for a structure from motion RGB-image pipeline”. *Remote Sensing*, 10(6), 2018.
- [13] Whitehead, K., Hugenholtz, C. H., Myshak, S., Brown, O., LeClair, A., Tamminga, A., Barchyn, T. E., Moorman, B., & Eaton, B. “Remote sensing of the environment with small unmanned aircraft systems (UASs), part 2: scientific and commercial applications”. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 02(03), 86–102, 2014.
- [14] Nevalainen, O., Honkavaara, E., Tuominen, S., Viljanen, N., Hakala, T., Yu, X., Hyypää, J., Saari, H., Pölönen, I., Imai, N. N., & Tommaselli, A. M. G. “Individual tree detection and classification with UAV-Based photogrammetric point clouds and hyperspectral imaging”. *Remote Sensing*, 9(3), DOI:10.3390/rs9030185, 2017.
- [15] Nurminen, K., Karjalainen, M., Yu, X., Hyypää, J., & Honkavaara, E. “Performance of dense digital surface models based on image matching in the estimation of plot-level forest variables”. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 83, 104–115, 2013.
- [16] Puliti, S., Gobakken, T., Ørka, H. O., & Næsset, E. “Assessing 3D point clouds from aerial photographs for species-specific forest inventories”. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 32(1), 68–79, 2017.
- [17] Dandois, J. P., Olano, M., & Ellis, E. C. “Optimal altitude, overlap, and weather conditions for computer vision uav estimates of forest structure”. *Remote Sensing*, 7(10), 13895–13920, 2015.
- [18] Gómez-Candón, D., De Castro, A. I., & López-Granados, F. “Assessing the accuracy of mosaics from unmanned aerial vehicle (UAV) imagery for precision agriculture purposes in wheat”. *Precision Agriculture*, 15(1), 44–56, 2014.
- [19] Torres-Sánchez, J., López-Granados, F., Borra-Serrano, I., & Manuel Peña, J. “Assessing UAV-collected image overlap influence on computation time and digital surface model accuracy in olive orchards”. *Precision Agriculture*, 19(1), 115–133, 2018.
- [20] Lisein, J., Pierrot-Deseilligny, M., Bonnet, S., & Lejeune, P. “A photogrammetric workflow for the creation of a forest canopy height model from small unmanned aerial system imagery”. *Forests*, 4(4), 922–944, 2013.
- [21] Aguilar, J., Valdiviezo, P., Cordero, J., Riofrio, G., & Encalada, E. “Technologies and Innovation”. Presented at third international conference, CITI 2017, Guayaquil, Ecuador, 2017.
- [22] Elarab, M. “The Application of Unmanned Aerial Vehicle to Precision Agriculture: Chlorophyll, Nitrogen, and Evapotranspiration Estimation”. PhD.thesis, Utah State University, Utah, 2016.
- [23] Jaud, M., Passot, S., Le Bivic, R., Delacourt, C., Grandjean, P., & Le Dantec, N. “Assessing the accuracy of high resolution digital surface models computed by PhotoScan® and MicMac® in sub-optimal survey conditions”. *Remote Sensing*, 8(6), 2016.
- [24] Psirofonia, P., Samaritakis, V., Eliopoulos, P., & Potamitis, I. “Use of Unmanned Aerial Vehicles for Agricultural Applications with Emphasis on Crop Protection: Three Novel Case – studies”. *International Journal of Agricultural Science and Technology*, 5(1), 30–39, 2017.
- [25] Ribeiro-Gomes, K., Hernández-López, D., Ortega, J. F., Ballesteros, R., Poblete, T., & Moreno, M. A. “Uncooled thermal camera calibration and optimization of the photogrammetry process for UAV applications in agriculture”. *Sensors (Switzerland)*, 17(10), 9–11, 2017.

- [26] Comba, L., Biglia, A., Ricauda Aimonino, D., & Gay, P. "Unsupervised detection of vineyards by 3D point-cloud UAV photogrammetry for precision agriculture". *Computers and Electronics in Agriculture*, 155(December 2017), 84–95, 2018.
- [27] Duarte, L., Silva, P., & Teodoro, A. C. "Development of a QGIS plugin to obtain parameters and elements of plantation trees and vineyards with aerial photographs". *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 7(3), 14–19, 2018.
- [28] Lu, K., Xie, J., Wan, Y., & Fu, S. "Toward UAV-Based Airborne Computing". *IEEE Wireless Communications*, 26(6), 172–179, 2019.
- [29] Lee, H., Wang, J., & Leblon, B. "Using linear regression, random forests, and support vector machine with unmanned aerial vehicle multispectral images to predict canopy nitrogen weight in corn". *Remote Sensing*, 12(13), 2020.
- [30] Solano, J & Villalobos, R. "Regiones y subregiones climáticas de Costa Rica". 2020. [Online]. Disponible: <https://www.imn.ac.cr/>
- [31] Tapia, A., Guevara, M., y Segura, E. "Procesamiento de imágenes a partir de vehículos aéreos no tripulados usando software libre". Escuela de Ingeniería Forestal, ITCR, Cartago, Costa Rica. 2019.
- [32] Flores, Y., & Diaz, H. "Comparación de postproceso entre el software Pix4D y Agisoft Metashape de un levantamiento topográfico con RPAS", Bach tesis, Universidad Peruana Union, Lima, 2020.
- [33] Peña-Villasenín, S., Gil-Docampo, M., & Ortiz-Sanz, J. "Desktop vs cloud computing software for 3D measurement of building façades: The monastery of San Martín Pinario". *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 149, 2020.
- [34] Ulvi, A. "Documentation, Three-Dimensional (3D) Modelling and visualization of cultural heritage by using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) photogrammetry and terrestrial laser scanners". *International Journal of Remote Sensing*, 42(6), 1994–2021, 2021.
- [35] Tinkham, W. T., & Swayze, N. C. "Influence of agisoft metashape parameters on uas structure from motion individual tree detection from canopy height models". *Forests*, 12(2), 1–14, 2021.
- [36] Uzaktan, T., Dergisi, C. B. S., Zeybek, M., & Biçici, S. "3D Dense Reconstruction of Road Surface from UAV Images and Comparison of SfM Based Software Performance". 2(September), 96–105, 2021.
- [37] Nam-Bui, X., Quoc Long, N., Thi Thu Ha, L., Ngoc Quy, B., Goyal, R., Trong Hung, V., van Chung, P., Xuan Cuong, C., van Canh, L., & Hong Viet, L. "Flight Height of UAV and Its Influence on the Precise Digital Elevation Model of Complex Terrain". *Inzynieria Mineralna*, 2020(1), 179–186, 2020.
- [38] Zhang, J., Wang, C., Yang, C., Xie, T., Jiang, Z., Hu, T., Luo, Z., Zhou, G., & Xie, J. "Assessing the effect of real spatial resolution of in situ UAV multispectral images on seedling rapeseed growth monitoring". *Remote Sensing*, 12(7), 2020.
- [39] Kameyama, S., & Sugiura, K. (2021). "Effects of differences in structure from motion software on image processing of unmanned aerial vehicle photography and estimation of crown area and tree height in forests". *Remote Sensing*, 13(4), 1–22, 2021.
- [40] Fraser, B. T., & Congalton, R. G. (2018). "Issues in Unmanned Aerial Systems (UAS) data collection of complex forest environments". *Remote Sensing*, 10(6), 2018.
- [41] Santillan, J. R., Gesta, J. L. E., & Marcial, M. C. N. "Effects of Flight Plan Parameters to the Quality and Useability of UAS Photogrammetry Data Products for Tree Crown Delineation Effects of Flight Plan Parameters to the Quality and Useability of UAS Photogrammetry Data Products for Tree Crown Delineation". *International Conference on Unmanned Aerial System in Geomatics*. June, 10–13, 2021.
- [42] Pix4D. "How to process images taken at different flight height". Pix4D, 2021. 2021
- [43] OpenDroneMap. "Frequently Asked Questions". OpenDroneMap, 2021.
- [44] Pix4D. "Types of Mission/ Which type of mission to choose". Pix4D, 2021.
- [45] Pix4D. "System requirements: Minimum and recommended computer specifications". Pix4D, 2021.
- [46] Pix4D. "Processing speed". Pix4D, 2021.
- [47] Seifert, E., Seifert, S., Vogt, H., Drew, D., van Aardt, J., Kunneke, A., & Seifert, T. "Influence of drone altitude, image overlap, and optical sensor resolution on multi-view reconstruction of forest images". *Remote Sensing*, 11(10), 2019.