

**Monitoreo del crecimiento de plantas de piña (*Ananas comosus*) en los primeros seis meses del cultivo mediante la estimación de altura con imágenes RGB obtenidas con vehículos aéreos no tripulados.**

**Ricardo Hine Herrero**

**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA**

**Universidad de Costa Rica**

**Facultad de Ciencias Agroalimentarias**

**Escuela de Agronomía**

**2020**

**Monitoreo del crecimiento de plantas de piña (*Ananas comosus*) en los primeros seis meses del cultivo mediante la estimación de altura con imágenes RGB obtenidas con vehículos aéreos no tripulados.**

**Ricardo Hine Herrero**


**TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AGRÓNOMO CON EL GRADO DE LICENCIADO EN AGRONOMÍA**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Carlos Henríquez Henríquez**

**DIRECTOR DE TESIS**

  
\_\_\_\_\_  
**Dr. Isabel Cristina Chinchilla Soto**

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

  
\_\_\_\_\_  
**Lic. Bryan Alemán Montes**

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

  
\_\_\_\_\_  
**M.Sc. Sisgo Rachith Acuña Chinchilla**

**MIEMBRO DEL TRIBUNAL**

  
\_\_\_\_\_  
**Ph.D Luis Gómez Alpizar**

**DIRECTOR DE ESCUELA**

  
\_\_\_\_\_  
**Bach. Ricardo Hine Herrero**

**SUSTENTANTE**

**2020**

## **Dedicatoria**

A mis padres por haberme dado una educación excepcional y siempre fomentar la curiosidad.

## **Agradecimientos**

A don Carlos, Bryan y Cristina por haber confiado en mi para realizar esta investigación.

A la empresa Bananera del Caribe por permitirme realizar esta investigación en su finca.

A Denis y todo el equipo de campo por su apoyo durante este trabajo y amistad.

A Arnoldo y Javier por su apoyo y ayuda en este trabajo.

A Camila por todo su apoyo a lo largo de este trabajo.

A Sebastián por su ayuda con el análisis de datos.

## Tabla de Contenidos

<b><i>Dedicatoria</i></b> .....	<b><i>1</i></b>
<b><i>Agradecimientos</i></b> .....	<b><i>11</i></b>
<b><i>Tabla de Contenidos</i></b> .....	<b><i>1</i></b>
<b><i>Índice de Figuras</i></b> .....	<b><i>3</i></b>
<b><i>Índice de Cuadros</i></b> .....	<b><i>5</i></b>
<b><i>Resumen</i></b> .....	<b><i>7</i></b>
<b><i>Introducción</i></b> .....	<b><i>8</i></b>
<b><i>Objetivos</i></b> .....	<b><i>10</i></b>
<b>Objetivo general</b> .....	<b>10</b>
<b>Objetivos específicos</b> .....	<b>10</b>
<b><i>Marco Teórico</i></b> .....	<b><i>11</i></b>
<b>La piña y su importancia en Costa Rica</b> .....	<b>11</b>
Aspectos generales de la piña.....	11
Importancia de la piña en Costa Rica .....	11
Método de siembra.....	12
<b>Inducción floral en piña</b> .....	<b>12</b>
<b>Altura de planta, índice de área foliar y biomasa</b> .....	<b>13</b>
<b>Detección remota en la agricultura</b> .....	<b>15</b>
Estado actual de los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) en la agricultura.....	15
Uso de VANTs para la obtención de altura de planta, índice de área foliar y biomasa .....	16
Metodologías usadas para la determinación de altura, índice de área foliar y biomasa.....	17
Utilización de VANT en el cultivo de la piña.....	17
<b><i>Materiales y métodos</i></b> .....	<b><i>18</i></b>
<b>Área de estudio y adquisición de imágenes</b> .....	<b>18</b>
<b>Muestreo en campo</b> .....	<b>21</b>
<b>Procesamiento y análisis de imágenes</b> .....	<b>22</b>
<b>Análisis de datos</b> .....	<b>24</b>

<b>Generación del modelo .....</b>	<b>25</b>
<b><i>Resultados y discusión .....</i></b>	<b><i>27</i></b>
<b>Medidas de asociación y coeficiente de determinación.....</b>	<b>27</b>
Relación entre el índice de vegetación GRVI y el IAF y alturas utilizando promedios por evaluación.....	27
Relación entre el índice de vegetación GRVI y el IAF.....	38
<b>Modelos digitales de terreno y ortomosaicos.....</b>	<b>46</b>
<b>Modelos estadísticos .....</b>	<b>48</b>
<b><i>Conclusiones .....</i></b>	<b><i>53</i></b>
<b><i>Recomendaciones.....</i></b>	<b><i>55</i></b>
<b><i>Bibliografía .....</i></b>	<b><i>57</i></b>
<b><i>Anexos .....</i></b>	<b><i>63</i></b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1.</b> Imagen de la localización geográfica de la finca Bananera del Caribe; lugar donde se realizó el trabajo.....	18
<b>Figura 2.</b> Fotografía tomada de Google Earth donde se muestra la localización geográfica de los lotes 7 y 36. ....	19
<b>Figura 3.</b> Distribución espacial de los puntos de control del lote 36.....	20
<b>Figura 4.</b> Acercamiento a un punto de control para su identificación y marcaje en Agisoft Photoscan™.....	21
<b>Figura 5.</b> Diagramas de caja de la variable altura para las mediciones en campo del lote 7 eliminando valores extremos.....	32
<b>Figura 6.</b> Diagramas de caja de la variable altura para valores estimados con las fotografías aéreas del lote 7 eliminando valores extremos.....	32
<b>Figura 7.</b> Diagramas de caja de la variable altura para las mediciones en campo del lote 36 eliminando valores extremos.....	34
<b>Figura 8.</b> Diagramas de caja de la variable altura para los valores estimados con las fotografías aéreas para el lote 36 eliminando valores extremos.....	34
<b>Figura 9.</b> Ortofotografía (a) y modelo de elevación digital (b), utilizados como línea base de altura (Evaluación 0) para el lote 7.....	36

<b>Figura 10.</b> Ortofotografía (a) y modelo de elevación digital (b) utilizados como línea base de partida (Evaluación 0) para el lote 36.....	36
<b>Figura 11.</b> Diagramas de caja de la variable índice de área foliar para las mediciones físicas del lote 7 una vez eliminados los valores extremos.....	42
<b>Figura 12.</b> Diagramas de caja de la variable GRVI para los datos estimados de las fotografías aéreas del lote 7 una vez eliminados los lotes extremos.....	42
<b>Figura 13.</b> Diagramas de caja de la variable índice de área foliar para las mediciones físicas del lote 36 una vez eliminados los lotes extremos.....	43
<b>Figura 14.</b> Diagramas de caja de la variable GRVI para los datos estimados de las fotografías aéreas del lote 36 una vez eliminados los lotes extremos.....	44
<b>Figura 15.</b> Gráfico de BoxCox utilizado para transformar la variable respuesta.....	50



## Índice de Cuadros

<b>Cuadro 1.</b> Promedio por evaluación según características de interés y tipo de medición para los datos obtenidos en el lote 7.....	28
<b>Cuadro 2.</b> Promedio por evaluación según características de interés y tipo de medición para los datos obtenidos en el lote 36.....	29
<b>Cuadro 3.</b> Descriptivos de interés para la variable Altura según evaluación por tipo de medición para los datos finales del lote 7 expresado en centímetros.....	30
<b>Cuadro 4.</b> Descriptivos de interés para la variable Altura según evaluación por tipo de medición para los datos finales del lote 36 expresado en centímetros.....	31
<b>Cuadro 5.</b> Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura entre los datos obtenidos en campo y los datos estimados de las fotografías tomadas con un VANT, elegidas para el lote 7 luego de la eliminación de los valores extremos utilizando 10 centímetros de radio y el valor mínimo de pixel.....	33
<b>Cuadro 6.</b> Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura entre los datos obtenidos en campo y los datos estimados de las fotografías tomadas con un VANT, elegidas para el lote 36 luego de la eliminación de los valores extremos utilizando 20 centímetros de radio y el valor mínimo de pixel.....	35
<b>Cuadro 7.</b> Descriptivos de interés para la variable IAF/GRVI según evaluación por tipo de medición para los datos finales del lote 36.....	39
<b>Cuadro 8.</b> Descriptivos de interés para la variable IAF/GRVI según evaluación por tipo de medición para los datos finales del lote 36.....	39

<b>Cuadro 9.</b> Medidas de asociación y coeficiente de determinación para las medidas de IAF/GRVI según radio para el lote 7.....	40
<b>Cuadro 10.</b> Medidas de asociación y coeficiente de determinación para las medidas de IAF/GRVI según radio para el lote 36.....	41
<b>Cuadro 11.</b> Características de los modelos digitales de superficie generados en Agisoft Photoscan™ para cada una de las evaluaciones de los lotes 7 y 36.....	46
<b>Cuadro 12.</b> Criterios de información del modelo sobre la altura de las plantas.....	48
<b>Cuadro 13.</b> Criterios de información del modelo sobre el índice de área foliar.....	51

## Resumen

La implementación de una nueva metodología para la determinación del peso de la planta de piña (*Ananas comosus*) que sea más eficiente a la utilizada actualmente en un ámbito piñero donde la competencia es cada vez mayor, es una necesidad. El presente trabajo abordó este tema de manera exploratoria como un primer acercamiento a una posible metodología para la determinación del momento de forzamiento mediante fotografías aéreas. Se trabajó en dos lotes de una empresa piñera en la zona de Guácimo, donde mediante un plan de vuelo automático en la aplicación Drone Deploy™ se realizaron 11 evaluaciones a lo largo de 6 meses para determinar la altura y un índice de vegetación. En cada una de estas evaluaciones se realizaron mediciones de altura en campo e IAF mediante un ceptómetro y un vuelo programado para la obtención de las fotografías. Posteriormente, se procesaron para obtener las ortofotografías y los modelos de elevación digital y obtener de estos los datos de interés. La correlación obtenida utilizando el promedio de los datos de altura medidos en campo y los datos estimados de las fotografías aéreas, dio un  $r^2 = 0,75$  lo cual indica una correlación alta entre los datos. Para los datos de GRVI/IAF la correlación dio un resultado de  $r^2 = 0,87$  indicando una correlación muy alta. Además, se realizaron dos modelos, con los cuales se podría estimar la altura de la planta mediante datos estimados de las imágenes aéreas con un coeficiente de determinación de 0,55 y el IAF con los datos estimados de GRVI con un coeficiente de determinación de 0,90. Estos resultados son alentadores para realizar un monitoreo del crecimiento de las plantaciones convencionales de piña, manejando los bloques como una sola unidad. Lo anterior, debido a que las correlaciones realizadas en cada evaluación (utilizando todos los datos, no el promedio) tanto para altura como IAF/GRVI arrojaron resultados muy bajos (correlación casi inexistente), sugiriendo una necesidad de profundizar sobre la metodología para corroborar los efectos de la arquitectura de la planta, densidad de siembra y condiciones climáticas sobre la generación de los modelos y la precisión con la que estiman la altura y el GRVI de cada planta.

## Introducción

Actualmente a raíz de la tercera fase de domesticación del cultivo de la piña (Sanewski, 2018) se siembra a nivel mundial el híbrido MD-2, que debido a sus características favorables de aroma, color y dulzura se mantiene como la preferida en los mercados (Rodríguez *et al.*, 2016). Esta planta pertenece a la clase Liliopsida, específicamente a la familia Bromeliaceae. Es una planta herbácea, perenne, de porte erecto que produce una inflorescencia terminal resultando en un fruto múltiple (Bartholomew *et al.*, 2002). Este cultivo se siembra en latitudes muy variables, lo cual ocasiona que su ciclo (siembra a cosecha) varíe entre los 18 y 36 meses (Bartholomew *et al.*, 2002).

En Costa Rica este cultivo es de mucha importancia, sembrándose desde hace más de 50 años. No obstante, fue hasta inicios del año 2000 cuando verdaderamente se dio un auge en la cantidad de productores y el área cultivada (CANAPEP, s. f.). El cultivo, según CANAPEP (Cámara Nacional de Productores y Exportadores de Piña), genera cerca de 40000 empleos directos y 120000 empleos indirectos en el país. En el 2018 se contaba con 57327 hectáreas cultivadas y fue el tercer producto en las exportaciones del país, generando aproximadamente \$941,5 millones de dólares (O'neal, 2018).

La cultura de producción piñera se vio influenciada principalmente por la empresa Pindeco S.A. subsidiaria de Del Monte durante la década de los 80. Su ideología fue producir la mayor cantidad de fruta por hectárea por lo que el paquete tecnológico utilizado era alto en agroquímicos (Maglianesi, 2013). Así, por ejemplo, dentro de los agroquímicos utilizados se encuentran los compuestos para la inducción floral. Al ser la piña un cultivo de exportación con alta demanda comercial y con contratos internacionales ya establecidos, se deben realizar prácticas para garantizar el cumplimiento de estos contratos.

Una de estas prácticas comúnmente utilizadas para sincronizar la floración de las plantas y por ende su mantenimiento y cosecha, es la inducción floral. Esta práctica, conocida en el ámbito piñero como forzamiento, se realiza mediante la aplicación de productos que liberen etileno, como lo es el Ethrel<sup>®</sup>. Una vez aplicado este producto, su ingrediente activo, el etileno, induce la floración del cultivo (Taiz y Zeiger 2010). El momento de aplicación depende estrictamente del peso de la planta madre, siendo valores de 2,5-2,9 kg los adecuados. Debido a

que es necesario conocer el peso de la planta madre para realizar el forzamiento, convencionalmente se muestrean alrededor de 100 plantas por hectárea y se realiza un promedio de peso con estos datos. Este procedimiento, normalmente lo realizan cuadrillas de dos personas utilizando un balancín para pesar las plantas. Es importante recalcar que este muestreo es destructivo, por lo que una mala programación (realizado antes de tiempo) tiene como consecuencia pérdidas económicas no solo por la mano de obra, al tener que repetir el muestreo, sino también por la destrucción de las plantas.

Las áreas sujetas a forzamiento se conocen en el ámbito piñero con el nombre de bloques. Estos presentan un tamaño que oscila entre los 0,25 a 1 hectárea, donde las poblaciones varían entre las 65000 y 72500 plantas por hectárea. El ancho de estos bloques se define por la longitud del brazo del equipo de aplicación conocido como “Spray Boom” (15 metros) por lo que, de manera general, el ancho siempre es de 30 metros.

Durante los últimos años el concepto de agricultura de precisión ha ido tomando fuerza en Costa Rica. Este concepto se basa en el uso de tecnologías de la información para obtener datos precisos del cultivo casi en tiempo real y con ello tomar decisiones certeras como, por ejemplo, aplicar la cantidad adecuada de fertilizantes en el momento y lugar exacto; con esto se pretende optimizar los procesos y el uso de los insumos agrícolas (Bongiovanni *et al.*, 2006). Debido a los altos costos de mano de obra en el país, la alta oferta de piña por parte de otros países productores y la necesidad de disminuir los costos de producción para continuar siendo competitivos es de suma importancia el establecimiento una nueva metodología para la estimación del peso promedio por planta de piña, que sea más eficiente que la utilizada actualmente.

Una alternativa viable es el uso de imágenes aéreas como indicadores indirectos de vigor; mediante la estimación del GRVI (índice de vegetación verde-rojo, Green-red vegetation index por sus siglas en inglés) y la altura de planta por medio de métodos fotogramétricos sobre imágenes RGB (modo de color rojo, verde y azul; Red, Green and Blue por sus siglas en inglés) obtenidas con un vehículo aéreo no tripulado (VANT). Esta información permitiría, determinar el volumen en un área conocida, la cual, conociendo la densidad de siembra y la densidad del

material, se puede utilizar para estimar el peso promedio por planta y decidir si es momento o no de inducir a la floración.

Debido a la importancia económica del cultivo de la piña en la actualidad y en Costa Rica, es necesario encontrar una metodología que permita continuar siendo competitivos. Ante esta necesidad, el presente trabajo pretende explorar nuevas técnicas para la estimación de parámetros que influyan en la toma de decisión sobre la inducción, específicamente la altura e índice de vegetación/IAF.

## **Objetivos**

### **Objetivo general**

Validar una metodología para la determinación de la altura e índice de área foliar en plantas de piña (*Ananas comosus*) mediante el uso de fotografías aéreas RGB obtenidas por medio de vehículos aéreos no tripulados (VANTs).

### **Objetivos específicos**

Determinar la correlación entre los datos de altura de planta de piña (*Ananas comosus*) obtenidos mediante fotografías aéreas y los datos obtenidos de mediciones manuales en campo durante 6 meses del cultivo.

Determinar la correlación entre los datos del índice de vegetación de planta de piña (*Ananas comosus*) obtenidos mediante fotografías aéreas y los datos obtenidos de área foliar en campo durante 6 meses del cultivo.

Desarrollar un modelo con el cual se logre estimar de forma indirecta la altura y el índice de área foliar de plantas de piña (*Ananas comosus*).

## Marco Teórico

### La piña y su importancia en Costa Rica

#### *Aspectos generales de la piña*

La piña *Ananas comosus* es una planta perteneciente a la familia Bromeliaceae, nativa de América del Sur (INFOCOMM, 2000). Según FAO (2016) durante el 2014 se produjeron aproximadamente 25 millones de toneladas de fruta fresca a nivel mundial, cultivándose en más de 60 países. Esta planta perenne, produce una inflorescencia terminal la cual da lugar a un fruto múltiple. El tallo es erecto y sus hojas salen de manera tal que se asemeja a una macolla (Bartholomew *et al.*, 2002). Además, es una planta con el mecanismo fotosintético CAM, lo que la hace altamente eficiente para la utilización del agua (Bartholomew *et al.*, 2002). Por otra parte, al ser de una familia epífita, sus raíces son muy susceptibles a la pudrición bajo condiciones de exceso de agua en el suelo, por lo que una buena preparación del terreno y la utilización de drenajes son indispensables.

En el mercado actual la variedad utilizada es el híbrido MD-2. Si bien se encuentran todavía plantas de las variedades Champaka, Cayenne, entre otras, la tendencia es hacia utilizar solamente MD-2 (Ahmadi *et al.*, 2015).

#### *Importancia de la piña en Costa Rica*

En el año 2016, se cosecharon 2930661 toneladas de piña en el país, con un área en producción de 43000 hectáreas (FAOSTAT, 2016). Para el año 2015 se catalogó la piña producida en Costa Rica como la mejor del mundo (CANAPEP, 2015a). La importancia de este cultivo en Costa Rica radica en gran medida a la generación de empleos; de esta forma, este cultivo genera cerca de 32000 empleos directos y unos 120000 empleos indirectos (CANAPEP, 2015b). Actualmente, los mercados principales de exportación son Estados Unidos y Europa, los cuales son suplidos con fruta de 145 empresas exportadoras. Dentro de estas se encuentran Fyffes,

Dole, Upala Agrícola, Grupo Acón, Agro Industrial Bananera del Caribe, entre otras (CANAPEP, 2018). Si bien la producción de esta fruta se encontraba distribuida a lo largo de todo el territorio nacional durante sus primeras etapas, debido a aspectos de logística, mejor adaptabilidad a condiciones climáticas y suelos, entre otras razones, la piña actualmente se encuentra consolidada en las regiones Brunca, Huetar Norte y Huetar Atlántica (Aravena, 2005).

### *Método de siembra*

El método de siembra varía entre fincas, pero se ha generalizado la utilización de bloques que tienen 30 metros de ancho por 200 metros de largo. Los 30 metros se definieron así por la longitud de los brazos del equipo de aplicación. Al tener brazos de 15 metros de largo, con un pase por cada lado, se pueden cubrir los 30 metros del bloque. La designación de los bloques (dimensiones y orientación) se realiza bajo criterios técnicos propios de cada finca. Debido a lo mencionado anteriormente sobre la susceptibilidad de las raíces de piña a pudrirse, de manera convencional se prepara el terreno para la siembra de la siguiente manera: primero se utiliza una rastra pesada para incorporar el material vegetal sobrante, es común realizar cinco o seis pases de rastra para esto. Posteriormente se realizan dos pases con un subsolador para eliminar o disminuir la compactación del terreno. Luego se utiliza una rastra afinadora, para eliminar terrones grandes. De manera general con uno o dos pases se obtiene un buen resultado. Después de la rastra afinadora se realiza el encamado y por último se hacen los drenajes terciarios, secundarios y primarios si es necesario. La cantidad de pases de rastra pesada y afinadora depende de las propiedades del terreno y criterios de cada finca.

### **Inducción floral en piña**

Al ser la piña un cultivo extensivo cuyas labores de campo demandan mucho tiempo, se deben de realizar prácticas culturales para facilitar su manejo. Una de estas prácticas es la homogenización de la floración de las plantas para programar su mantenimiento y cosecha (Fassinou *et al.*, 2015).



Actualmente la inducción floral se realiza utilizando etileno, hormona que, si bien en la mayoría de las plantas inhibe la floración, en la piña la induce (Bartholomew, 2014). Esta inducción, también conocida como forzamiento, ocurre entre los 8 y 10 meses después de siembra. El momento de inducción depende de varios factores, siendo uno de los más importantes el peso de la planta madre a la hora de aplicar el etileno (Min, 1995). Se ha observado una relación directa entre el peso de la planta madre y el calibre de la fruta, dando una correlación positiva casi perfecta con un  $R^2= 0,9825$  (Lobo y Paull, 2017). El calibre de la fruta se define de acuerdo con cuantas frutas se pueden colocar en una caja de 11,65 kg.

Para determinar el peso de forzamiento, se deben de tomar 100 plantas por hectárea, acorde a un método de muestreo propio de cada finca. El peso de las plantas permite determinar el peso promedio y la homogeneidad de los pesos se utiliza como herramienta en la toma de decisión de forzamiento. Al tratarse de una práctica manual, se incurre en costos de mano de obra, ya que se estima que esta labor toma 6 horas por hectárea. Igualmente, se corren riesgos de muestreos equivocados debido a la subjetividad a la hora de escoger las plantas.

Una vez que se toma la decisión de inducir la floración, se procede a aplicar algún producto de manera foliar que libere etileno. Normalmente se utilizan los productos comerciales Ethrel® o Etefón® en dosis de 2 litros por hectárea con un repaso a las 48 horas después con una dosis similar. Esto se realiza con aplicaciones de 3000-6000 litros de caldo. Es importante recalcar que, una vez realizada la inducción floral, no hay posibilidad de revertir el efecto; por ello, la precisión en la determinación del peso es fundamental para definir el momento correcto de la inducción.

### **Altura de planta, índice de área foliar y biomasa**

La altura de planta se puede definir como la distancia perpendicular al suelo desde un punto establecido, que normalmente es el cuello de la planta (parte donde inicia el tallo) hasta el punto más alto alcanzado por la planta de forma natural (Heady, 1957). La altura de planta es un parámetro por tomar en cuenta para describir y analizar el crecimiento de una planta y con ello estimar variables de campo como el rendimiento y el estado general de la plantación

(Melgarejo, 2010). Su utilización para la estimación del rendimiento ha sido demostrada por Lumme *et al.*, (2008) en los cultivos de cebada, trigo, avena y arroz. Por otra parte, Tilly *et al.*, (2014) demostraron que es posible estimar la biomasa en arroz utilizando datos de altura de planta obtenidos mediante un scanner laser.

El índice de área foliar por otro lado se puede definir como la superficie total de hojas ( $m^2$ ) que están presentes sobre cada metro cuadrado de suelo (West, 2006). Sus usos son amplios, siendo el cálculo de la reflectancia uno de los más relevantes en contexto de esta investigación (Liang *et al.*, 2012). Mediante la utilización de la reflectancia (fracción de la luz solar incidente, reflejada por una superficie) se pueden estimar índices de vegetación como por ejemplo el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI por sus siglas en inglés) y con estos índices inferir la salud del cultivo, parches de enfermedad, incidencia de arvenses, entre otros (Berni *et al.*, 2009). Por su parte, el GRVI es un índice de vegetación calculado con las bandas Verde y Rojo de las fotografías RGB, esto como una alternativa utilizando cámaras convencionales RGB ante la carencia de información en longitudes de onda del infrarrojo cercano.

Kyu y Byun (2011), mencionan que es posible determinar el índice de área foliar mediante imágenes aéreas y posteriormente utilizar estos datos para estimar la biomasa. Esta estimación se realiza multiplicando la altura de planta por el índice de área foliar.

La biomasa, definida como la cantidad total de materia viva de cualquier organismo en un área determinada, es un parámetro con muchas aplicaciones, entre ellas se encuentra la utilización de esta en estimaciones de rendimientos (Adamchuk *et al.*, 2010). También se utiliza para conocer el vigor de la plantación, su salud, entre otros (Adamchuk *et al.*, 2010). Además, es necesaria para el cálculo del índice de nutrición de nitrógeno o NNI por sus siglas en inglés (Lemaire and Gastal, 2002). Este índice describe el estado del nitrógeno en todo el cultivo, indicando si el nivel de nitrógeno está por encima o debajo del valor óptimo (Mistele y Schmidhalter, 2008).

La utilización de los parámetros altura de planta, índice de área foliar y biomasa en plantaciones comerciales de piña no es común; sin embargo, mediante la utilización de la altura y el índice de vegetación, se podría estimar la biomasa para luego conocer la densidad del material (planta de

piña) y la densidad de siembra, estimar el peso promedio de la plantación y tomar la decisión de inducir o no a la floración.

### **Detección remota en la agricultura**

La teledetección o detección remota se puede definir como: "la técnica de identificación, clasificación y determinación de objetos, además de la obtención de información física de estos sin tener contacto, por medio de la utilización de sensores" (Okamoto, 2001). Este método de obtención de información es sumamente importante en el sector agrícola. Atzberger, (2013) menciona que al ser tan variables los factores de los cuales depende la producción (patrones de temporada, variables físicas y químicas del suelo y variables climáticas) es de suma importancia encontrar un método que permita obtener información de manera precisa y casi inmediata sobre el estado del cultivo y/o las variables que lo afectan.

Dentro de las aplicaciones de esta tecnología en la agricultura se pueden mencionar: la evaluación del daño en el cultivo, estimación de rendimiento, condición hídrica del cultivo, se puede utilizar para evaluar aplicaciones, determinar la erosión del suelo, entre otras (Steven y Clark, 2013).

#### *Estado actual de los vehículos aéreos no tripulados (VANTs) en la agricultura*

En los últimos años, la necesidad de optimizar los procesos de producción agrícola ha incentivado la incorporación cada vez más frecuente de la tecnología en la agricultura, siendo el uso de los VANTs una herramienta incorporada recientemente a los procesos de producción agrícola (Hill, 2018). Su impacto es tan grande que una estimación de un economista proyectó un impacto de 1,6 billones de dólares en los primeros tres años de introducida esta tecnología (2015-2018), siendo el sector agrícola el principal nicho (Ehsani y Maja, 2013). Si bien sus usos en la agricultura son prácticamente ilimitados, se pueden mencionar algunos como: medición de áreas efectivas de producción, análisis indirectos de suelos y del cultivo y monitoreo del cultivo mediante imágenes obtenidas con cámaras RGB o multiespectrales; además se pueden

mencionar otras aplicaciones donde no intervienen el uso de sensores: aplicaciones foliares, aplicaciones en riego, entre otros (Mazur, 2016).

### *Uso de VANTs para la obtención de altura de planta, índice de área foliar y biomasa*

Actualmente, se ha profundizado en la investigación sobre el uso de imágenes RGB para la obtención indirecta de datos en campo. Dentro de estos datos, se encuentra la altura de planta, el índice de área foliar y la biomasa. Bendig *et al.* (2013), demostraron que es posible determinar la altura de planta y monitorear el crecimiento de las plantas de arroz. No obstante, mencionan que se debe de mejorar aspectos metodológicos para obtener datos absolutos de altura de planta y poder diferenciar cultivares, estos ajustes metodológicos abarcan: la toma de datos y el procesamiento de estos. Específicamente, se puede mejorar el VANT, el sensor, el porcentaje de traslape entre fotos, así como aumentar el área fotografiada para evitar el efecto barril, obtener datos reales en los bordes de la foto y la toma de puntos de control para corregir los resultados del procesamiento de imágenes.

Por otra parte, Kyu y Byun (2011), encontraron que es posible determinar el índice de área foliar en arroz con un  $R^2=0,94$  y que además se pueden utilizar las mismas imágenes para determinar parámetros de crecimiento sin destruir plantas. En cuanto a biomasa, Bendig *et al.*, (2014) y Zhang *et al.*, (2018), comprobaron que es posible estimar la biomasa mediante imágenes aéreas obtenidas con un VANT en cebada con un  $R^2= 0,71$  y pasto con un  $R^2= 0,89$ . En ambos casos se utilizó la altura de planta estimada mediante las imágenes para estimar la biomasa del cultivo. Multiplicando los datos de altura e índice de área foliar se obtiene el total de volumen presente en el área en estudio. Luego, conociendo la densidad de siembra, se divide ese volumen total entre la cantidad de plantas y conociendo la densidad del material, se estima el peso promedio por planta.

### *Metodologías usadas para la determinación de altura, índice de área foliar y biomasa.*

Las metodologías utilizadas varían entre investigadores. Bendig *et al.*, (2013) utilizaron un VANT MK-Okto con una cámara Panasonic Lumix DMC GF3 y un lente de 20mm F1.7. Las fotos se tomaron a 50 metros de altura de manera que el patrón de vuelo fue de tres pases por el lote (Anexo 1). Posteriormente las imágenes obtenidas fueron procesadas y se crearon los modelos digitales de superficie (MDS) del cultivo o CSMs por sus siglas en inglés (Crop Surface Models). Los CSMs se realizaron utilizando el software Agisoft PhotoScan 0.9.0., donde se alienaron las imágenes, se crearon los ortomosaicos y los respectivos MDS. Posteriormente, utilizaron algoritmos de análisis ráster en ArcGIS y se determinó la altura de planta y por tanto el crecimiento del cultivo. En el Anexo 2 se encuentra el diagrama de flujo del procesamiento de los datos seguido por Bendig *et al.* 2013

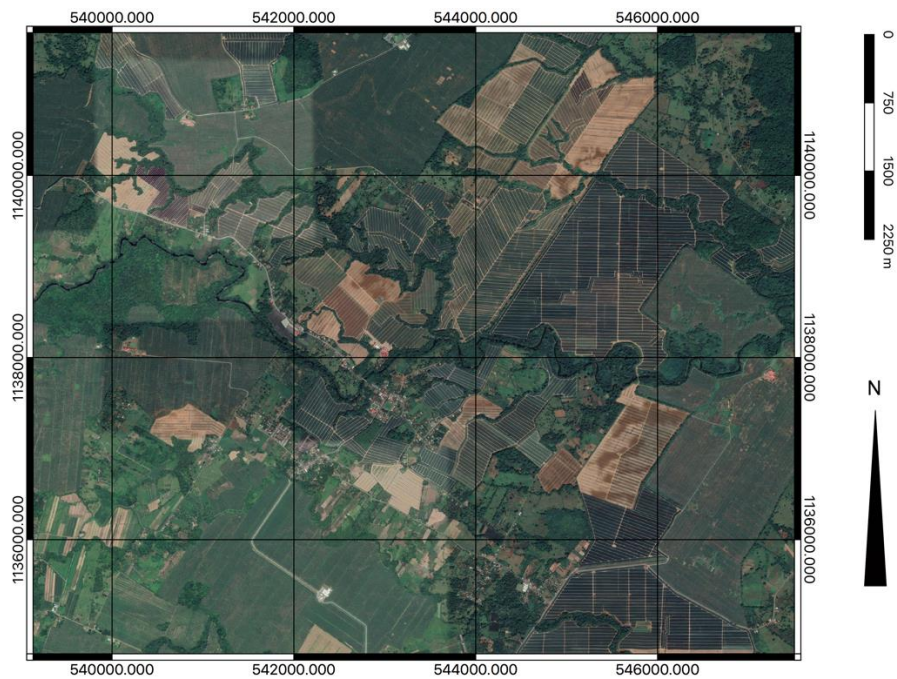
### *Utilización de VANT en el cultivo de la piña.*

La utilización de esta tecnología en nuestro país es aún incipiente. El Centro de Investigaciones Agronómicas (CIA) ha venido desarrollando esta tecnología en los últimos años principalmente en investigaciones en los cultivos de caña de azúcar, palma aceitera y papaya. Además, diferentes empresas implementan esta tecnología. Al igual que el CIA, los cultivos en donde se utilizan mayormente estas tecnologías son caña y monocultivos, donde se realizan conteo de plantas por medio de imágenes aéreas, cobertura foliar, predicción de cosecha, entre otros. No obstante, en plantaciones comerciales de piña no es común encontrar esta tecnología siendo utilizada para estimar indicadores como la altura de planta e índice de área foliar. En aplicaciones comerciales se han utilizado los VANTs para monitorear aplicaciones de herbicidas en la etapa de preparación de terreno, monitoreo de parches de enfermedad, entre otros. Al momento de realizar este trabajo, no se encontró literatura sobre la utilización de estas tecnologías en el cultivo de la piña específicamente estimando altura e índice de área foliar pero como se mencionó anteriormente, ya se ha utilizado en otros cultivos (arroz, cebada) de manera exitosa en otros países.

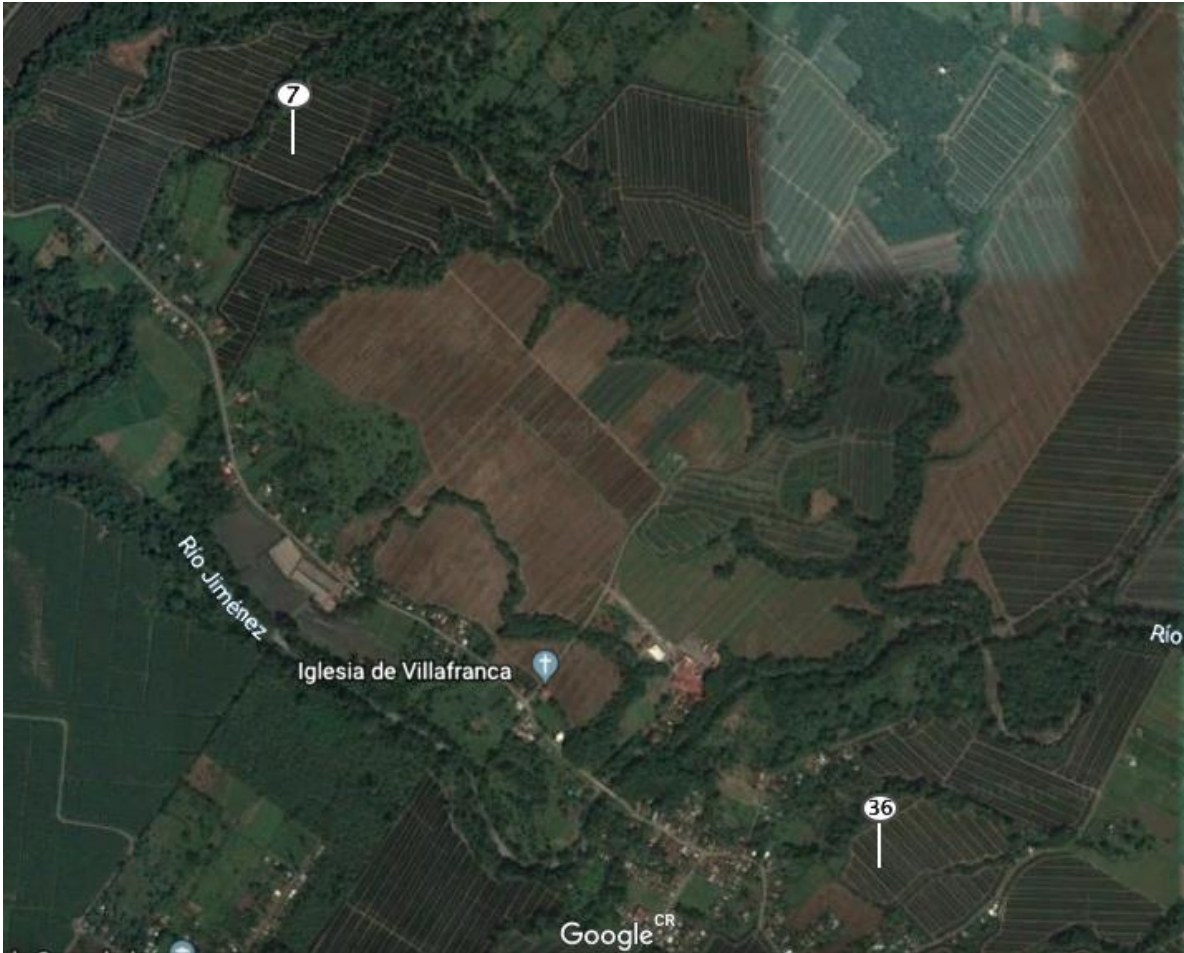
## Materiales y métodos

### Área de estudio y adquisición de imágenes

El área de estudio se ubica en el distrito Guacarí del cantón Guácimo, en la provincia Limón, específicamente en zona noreste de Costa Rica (Figura 1). Se trabajó en lotes pertenecientes a la empresa Agroindustrial Bananera del Caribe S.A. donde se utilizaron dos bloques de piña identificados como lote 7 y lote 36 (Figura 2). El lote 7 tiene un área de 4748m<sup>2</sup> y se ubica en las coordenadas 10°18'16" latitud Norte y 83°37'00" longitud Oeste. En este lote se realizó el primer vuelo a los cuatro meses después de la siembra. El lote 36 tiene un área de 3767m<sup>2</sup> y se ubica en las coordenadas 10°17'12" latitud Norte y 83°36'09" longitud Oeste. El primer vuelo realizado en este lote fue una semana antes de la siembra.



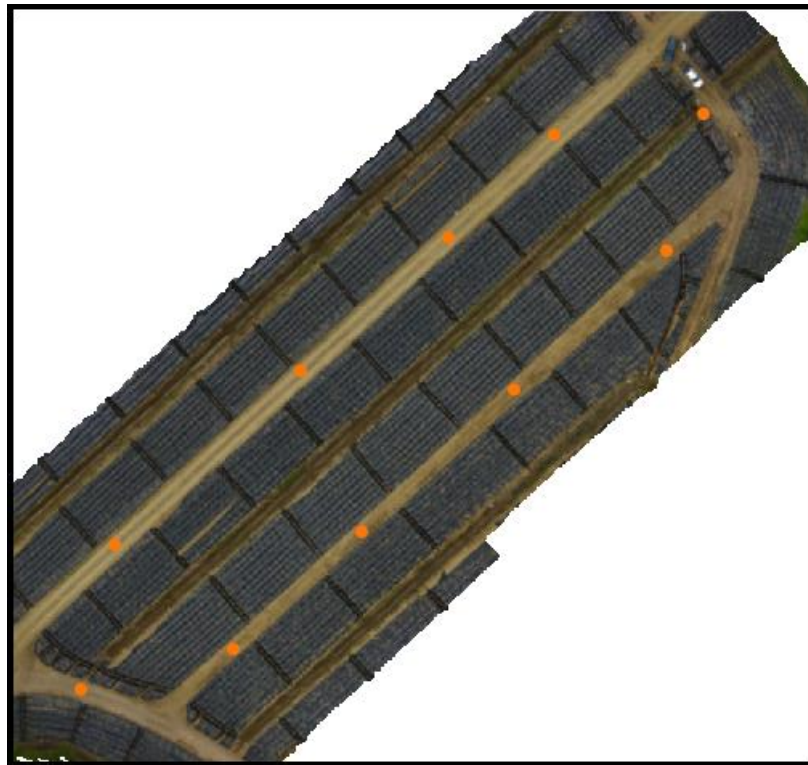
**Figura 1.** Imagen de la localización geográfica de la finca Bananera del Caribe; lugar donde se realizó el trabajo.



**Figura 2.** Fotografía tomada de Google Earth donde se muestra la localización geográfica de los lotes 7 y 36.

Para la obtención de las imágenes se utilizó un VANT de la marca DJI modelo Phantom 4. Este dispositivo posee una cámara con un sensor CMOS de 1/2,3" con 12,4 megapíxeles efectivos y un lente gran angular de 20mm. Se utilizó el software DroneDeploy™ para realizar el plan de vuelo. Este plan se realizó con las siguientes especificaciones: altura de vuelo 15 metros para una resolución de 1,0cm/píxel, 80% de traslape frontal, 75% de traslape lateral y dirección y velocidad optimizadas automáticamente por el software. Además, la exposición (ISO), la apertura (valor de f) y la velocidad de obturación de la cámara utilizaron valores calculados automáticamente por el software. Se intentó, en la medida de lo posible, realizar los vuelos con condiciones climáticas similares y a la misma hora.

Se utilizó una estación total marca GeoMax para establecer con alta precisión las coordenadas de 10 puntos de control situados en el perímetro de cada lote. La ubicación de los puntos de control se realizó de manera aleatoria, tomando en cuenta únicamente que la distribución de estos puntos fuera uniforme y abarcara todo el perímetro del lote (Figura 3 y 4). En ambos lotes se ubicaron los puntos de control siguiendo la misma metodología. Se utilizaron estacas de madera, las cuales se enterraron 15 centímetros en el suelo y se pintaron con pintura anaranjada. Se ubicaron en el centro de la calle de manera que los vehículos que transitaran la calle disturbaran lo menor posible estos puntos. En la Figura 4 se puede observar un punto de control en uno de los ortomosaicos.



**Figura 3.** Distribución espacial de los puntos de control del lote 36.





**Figura 4.** Acercamiento a un punto de control para su identificación y marcaje en Agisoft Photoscan™.

### **Muestreo en campo**

En cada uno de los bloques (lote 7 y 36) se marcaron 58 y 57 plantas respectivamente. El marcaje de las plantas se realizó de manera aleatoria escogiendo tres o dos plantas en cada sub-bloque. Las evaluaciones en el lote 7 se iniciaron cuando el cultivo tenía cuatro meses, se escogieron 3-2 plantas por fila de siembra en cada sub-bloque, debido a la dificultad para desplazarse de manera diagonal por el sub-bloque (Anexo 3b). Para el lote 36 debido a que se inició el ensayo estando el lote sin cultivo, se escogieron 3 plantas en diferentes filas de siembra por sub-bloque (Anexo 3a). Posteriormente, cada  $15 \pm 1$  días se realizaron las evaluaciones. En estas evaluaciones se midió en campo la altura de la planta tomando la hoja D (la hoja más joven completamente desarrollada) y se midió con una cinta métrica (desde el ápice hasta el suelo). Además, se realizó la medición del índice de área foliar utilizando un ceptómetro AccuPAR LP-80 (Decagon Devices Inc, Washington, USA). Lo anterior se realizó según las especificaciones del fabricante, insertando el aparato por debajo del dosel de la piña de manera diagonal-ligeramente inclinado de forma tal que el aparato quedara perpendicular a la cama de siembra (Anexo 4).

También se realizó un análisis foliar y de suelo en ambos lotes con el fin de tener así una idea clara de los niveles de nutrientes en las plantas y el suelo, así como las características físicas del aérea de estudio. En los anexos 5, 6, 7 y 8 se pueden encontrar los resultados de estos análisis.

### **Procesamiento y análisis de imágenes**

El procesamiento de las imágenes se realizó mediante el software Agisoft PhotoScan™. En este software se utilizó un flujo de trabajo con el siguiente orden. 1) se alinean las imágenes automáticamente mediante el software. 2) manualmente se ingresan los puntos de control y se marcan en las imágenes donde se observen. Estos puntos de control, previamente tomados y marcados en campo, ayudan a corregir los mosaicos de imágenes y reducir el error en las coordenadas x, y, z. 3) una vez ingresados los puntos de control y con un valor de error aceptable (menor a 10 cm) se continúa con la generación de la nube densa de puntos. Esta nube densa se define como un set de datos (puntos) representados de manera tridimensional en el espacio. 4) se genera la malla a partir de la nube densa. Esta malla tiene la función de tomar todos los puntos de la nube densa y unirlos de manera que se obtenga una superficie continua. 5) terminado este proceso, continúa la generación del modelo de elevación digital (DEM por sus siglas en inglés) y la ortofotografía. El DEM se utiliza para obtener los valores de altura mientras que la ortofotografía es una guía visual y se utiliza para estimar el índice de vegetación verde-rojo, el cual se compara con el IAF. 6) Por último se exportan estos dos archivos (DEM y ortofotografía) y se analizan en QGIS™.

El cálculo de la variable altura, se realizó mediante altimetría pero de manera distinta en los lotes 7 y 36. Lo anterior radica en que debido a que en el lote 36 se comenzó a evaluar cuando aún no estaba sembrado, se contó con el DEM 0 (superficie de siembra) el cual no se tenía para el lote 7. Para el lote 36, mediante la calculadora ráster se procesaron los diferentes modelos de elevación digital de cada evaluación. En este proceso se realizó la resta del DEM de interés (DEM de las evaluaciones 1 en adelante) menos el DEM 0 (Evaluación 0) para obtener un nuevo DEM con la altura de la planta. Para el lote 7 se realizó un promedio de la altura de tres puntos en la entrecalle inmediata a la planta de interés de manera manual utilizando el DEM 0, para luego

restarle ese valor al valor obtenido de los DEM's del 1 en adelante y así conocer la altura de la planta.

En QGIS™ se analizaron los valores de altura e índice de vegetación verde-rojo. Para la estimación de ambos valores, se creó una capa vectorial en donde se marca cada planta (identificada en la ortofotografía por una cinta anaranjada) con un punto. Este punto se utilizó para hacer un buffer (área de influencia), que se utilizó para extraer los valores de altura y de índice de vegetación calculados en todos los vuelos, esta extracción se realizó utilizando buffer de 1, 10 y 20 centímetros de radio para extraer el valor de altura y 5, 10 y 20 centímetros de radio para extraer el valor de índice de vegetación. Posteriormente, se utilizó la herramienta Zonal Statistics de QGIS para extraer la información de interés de las variables altura y GRVI. La información extraída en QGIS fueron los valores mínimo, promedio y máximo de los píxeles incluidos dentro de los buffers de altura e índice de vegetación. Se realizó de esta manera por ser una investigación exploratoria con el fin de conocer con cual variable se tendría un mejor resultado.

En este estudio se utilizó el índice GRVI el cual utiliza los valores del verde y del rojo según la fórmula 1. Para este caso, se utilizó solamente la variable suma ya que mediante ensayos preliminares, se concluyó que la mejor correlación se da con la variable suma. Es decir, el software suma todos los valores de los píxeles que estén dentro del buffer. Para estimar el índice GRVI se utiliza la calculadora ráster, donde se realiza la siguiente ecuación:

$$(1) GRVI = \frac{\textit{banda verde} - \textit{banda roja}}{\textit{banda verde} + \textit{banda roja}}$$

La ecuación del GRVI produce valores entre -1 y 1. Siendo valores inferiores a 0,18 suelo expuesto y valores cercanos a 1, vegetación completamente cubierta. A partir de un proceso de selección espacial en la calculadora ráster se aislaron los valores con un valor de GRVI superior a 0 mediante un algoritmo ya que estos corresponden a la información de interés. Estos datos se utilizaron para realizar la correlación contra los datos obtenidos de IAF en campo.

Por otra parte, el ceptómetro Accu-Par LP80 se basa en la Ley de Beer (ecuación 2) para estimar el índice de área foliar.

$$(2) PAR_t = PAR_i \exp(-kz)$$

Donde PAR<sub>t</sub> es la radiación fotosintéticamente activa transmitida cerca del suelo, PAR<sub>i</sub> es la radiación fotosintéticamente activa sobre el dosel del cultivo, z es la longitud de la luz absorbida y k es el coeficiente de extinción.

### **Análisis de datos**

Una vez obtenidos el conjunto de datos de altura e índice de área foliar/vegetación medidos en campo, como los estimados mediante las fotografías aéreas, se procede a realizar una correlación lineal simple entre los dos métodos de determinación para cada una de las variables para calcular el coeficiente de correlación ( $r^2$ ). Para esto se utiliza la siguiente fórmula 3:

$$(3) r_{xy} = \frac{S_{xy}}{S_x S_y}$$

$$r = \left( \frac{n \sum x_i y_i - (\sum x_i)(\sum y_i)}{\sqrt{((n \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2)(n \sum y_i^2 - (\sum y_i)^2))}} \right)^2$$

Donde:

$S_{xy}$  = covariancia de xy

$S_x$  = desviación estándar de x

$S_y$  = desviación estándar de y

Como criterio de decisión para saber si un resultado es o no satisfactorio en este estudio, se utilizaron valores del coeficiente de determinación ( $r^2$ ) mayores o iguales a 0,7 (correlación moderada a moderadamente alta) debido a la variabilidad de los datos en campo al tener una población tan grande (70000 plantas/ha). Una vez realizado este análisis de los diferentes diámetros de puntos para altura con cada una de las medidas de posición utilizadas (mínimo, promedio y máximo) e índice de vegetación, se utiliza el que, con base en todas las evaluaciones, tenga un mejor  $r^2$ .

Al obtener las medidas que se ajustan mejor a los criterios establecidos, se realizó un análisis de valores extremos para valorar cuales deben eliminarse y cuáles no. Basado tanto dentro de cada evaluación y tipo de medición (física y por VANT) como entre las mediciones. Para esto se hizo uso de un gráfico de cajas para tomar esta decisión. Una vez eliminados estos valores extremos, se realizó nuevamente la determinación del coeficiente de correlación para cada fecha de evaluación con las tres medidas elegidas y se procedió a comparar las diferencias de estos valores con los originales, siempre y cuando se eliminen valores extremos.

Para las correlaciones no consideradas moderada a moderadamente alta, se procedió a realizar una correlación con los valores promedio de evaluación, ya que, para efectos prácticos en campo, el bloque de siembra se maneja como una unidad productiva por lo que no es necesario saber con exactitud la altura e índice de vegetación de cada planta.

### **Generación del modelo**

Para el modelo de regresión lineal se plantea como variable respuesta las mediciones físicas y como variable independiente todas las mediciones asociadas al VANT, además que se consideraría cualquier otra variable que pueda ayudar a explicar variabilidad. En cada caso se consideró primeramente la significancia de las variables; Se utilizó la hipótesis nula  $H_0 =$  variable igual a 0. Posteriormente se analizó la normalidad de los residuos utilizando la prueba Shapiro-Wilks, donde  $H_0 =$  Los residuos presentan una distribución normal. Luego se analizó la homoscedasticidad mediante la prueba Breush-Pagan y donde la  $H_0 =$  Los residuos presentan una varianza constante. En este caso la multicolinealidad no se analizó porque no hay suficientes

variables para analizar el supuesto. Por último, se consideró el coeficiente de determinación para medir el nivel de variabilidad explicada.

Debido al incumplimiento de un supuesto en el modelo para el IAF, se remedió mediante la transformación de la variable respuesta con la transformación de BoxCox y se eligió la mejor transformación. Luego se corrió el modelo nuevamente con la variable respuesta transformada y se volvió a evaluar todo como fue descrito anteriormente y en el mismo orden descrito.

## Resultados y discusión

El presente estudio abordó el tema de la determinación de la altura de planta e índice de área foliar mediante fotografías aéreas de manera exploratoria. Debido a la falta de información sobre estas metodologías en el cultivo de piña (*Ananas comosus*) se realizaron correlaciones utilizando todos los datos y correlaciones utilizando los promedios por evaluación. El resultado de estos últimos (promedio por evaluación) arrojó mejores resultados y se muestra a continuación.

### **Medidas de asociación y coeficiente de determinación**

*Relación entre el índice de vegetación GRVI y el IAF y alturas utilizando promedios por evaluación*

En el Cuadro 1 se pueden observar los datos promedio por evaluación tanto para la altura como el IAF/GRVI para el lote 7. Se puede observar un comportamiento particular en las evaluaciones 2, 4 y 6 de los datos estimados con las fotografías aéreas para la altura ya que los promedios disminuyen considerablemente respecto a la evaluación anterior a estas. Para los datos de IAF/GRVI se observa un comportamiento esperable con excepción de la última evaluación. Las correlaciones presentan un  $r^2$  de 0,54 para altura y 0,72 para IAF/GRVI. Además se observan las desviaciones promedio de los datos para las evaluaciones de altura y GRVI/IAF de lote 7. Las primeras tres evaluaciones físicas de altura presentan una desviación de aproximadamente 3,14 centímetros. Se puede observar esta relación en la Figura 5, donde en las primeras tres evaluaciones los datos se encuentran más concentrados. En las últimas tres evaluaciones la desviación aumenta. Para los datos estimados mediante las fotografías aéreas la desviación se encuentra alrededor de los 13 centímetros para las primeras cuatro evaluaciones y 19 centímetros para las últimas dos. En cuanto a los datos de IAF se observa un incremento en la desviación desde la evaluación 1 hasta la 4. Luego una disminución y un aumento en la última

evaluación. Con los datos de GRVI estimados mediante las fotografías sucede algo similar, no obstante, en la última evaluación la desviación disminuye en lugar de aumentar.

**Cuadro 1.** Promedio por evaluación según características de interés y tipo de medición para los datos obtenidos en el lote 7.

Evaluación	Altura (cm)		IAF / GRVI	
	Física	VANT	Física	VANT
1	28,95 ± 3,36	44,25 ± 12,65	2,18 ± 0,34	111,59 ± 29,54
2	29,49 ± 3,01	42,77 ± 13,61	2,37 ± 0,48	145,07 ± 29,70
3	34,36 ± 3,05	51,89 ± 13,89	3,14 ± 0,66	188,85 ± 38,75
4	50,51 ± 5,97	39,68 ± 13,84	4,91 ± 1,30	266,59 ± 72,02
5	52,20 ± 4,93	71,69 ± 19,36	5,02 ± 0,99	310,53 ± 54,43
6	53,51 ± 4,78	58,28 ± 19,17	5,89 ± 1,08	191,80 ± 33,47
	<b>r<sup>2</sup> altura = 0,54</b>		<b>r<sup>2</sup> IAF/GRVI = 0,72</b>	

En el Cuadro 2 se observan los promedios de los datos de altura e IAF/GRVI en cada evaluación para el lote 36. Al igual que con el lote 7, al realizar la correlación con los promedios, los resultados son muy superiores a los obtenidos utilizando los datos de manera individual. Se puede observar que ambas correlaciones son superiores a las obtenidas con el lote 7. La desviación de los datos por evaluación en el lote 36 es sumamente alta. Se observa que conforme avanzan las evaluaciones las desviaciones son mayores tanto en el IAF/GRVI como en la altura. Esto es contradictorio con lo esperado, ya que al utilizar la evaluación 0 como punto de partida se esperaba un modelo con mayor precisión que proporcionara desviaciones menores. Se podrían comparar la evaluación 1 del lote 7 con la evaluación 8 del lote 36. Se puede observar que cuando la plantación tenía 4 meses de edad, la desviación de los datos es menor en el lote 7 que en el lote 36, respaldando que el modelo utilizado para la estimación en el lote 36 carece de precisión.



**Cuadro 2.** Promedio por evaluación según características de interés y tipo de medición para los datos obtenidos en el lote 36.

Evaluación	Altura (cm)		IAF/GRVI	
	Física	VANT	Física	VANT
1	25,71 ± 2,75	33,30 ± 13,58	0,58 ± 0,16	138,27 ± 58,59
2	32,88 ± 2,88	34,54 ± 14,40	0,64 ± 0,16	159,30 ± 44,96
3	40,67 ± 4,40	36,85 ± 17,01	1,02 ± 0,29	248,36 ± 112,99
4	56,58 ± 6,84	33,81 ± 15,74	1,68 ± 0,52	663,88 ± 187,12
5	70,40 ± 8,37	51,30 ± 19,36	1,76 ± 0,54	804,83 ± 176,60
6	79,26 ± 9,14	43,12 ± 19,27	1,87 ± 0,28	571,10 ± 225,43
7	84,36 ± 8,07	38,43 ± 15,93	3,43 ± 0,94	739,52 ± 645,97
8	88,49 ± 9,00	53,59 ± 21,65	2,49 ± 0,40	1712,38 ± 302,49
9	92,04 ± 8,77	53,29 ± 20,70	4,41 ± 1,05	1826,45 ± 395,79
10	93,09 ± 9,80	72,17 ± 21,10	3,65 ± 0,78	2026,72 ± 356,87
11	92,73 ± 9,23	77,21 ± 20,93	4,99 ± 0,74	1951,72 ± 363,31
	<b>r<sup>2</sup> altura = 0,7481</b>		<b>r<sup>2</sup> IAF/GRVI = 0,8760</b>	

Si bien los resultados obtenidos correlacionando dato con dato por evaluación no fueron satisfactorios (Cuadros 5 y 6), se puede observar en los Cuadros 1 y 2 que utilizando los promedios de estas evaluaciones se obtienen mejores resultados. De forma práctica estos resultados son alentadores ya que de manera convencional el bloque de piña se maneja como una sola unidad productiva por lo que no es necesario conocer parámetros de cada planta. No obstante, la correlación obtenida para los datos de altura es relativamente baja por lo que se cree que factores como la arquitectura de la planta y densidad de siembra presentan un obstáculo para poder estimar la altura de manera precisa con fotografías aéreas. No así, en el caso del IAF/GRVI se obtiene una correlación satisfactoria la cual se podría utilizar para la toma de decisiones en la práctica.

## Relación entre altura estimada con VANT y altura real

Los datos obtenidos de altura mediante las mediciones manuales en campo y los datos estimados de las fotografías aéreas del lote 7 se muestran en el Cuadro 3. Si se observan las evaluaciones 1 y 2 el valor mínimo para la medición física como la del VANT, se puede notar cierto tipo de asociación. Así mismo, durante las evaluaciones 3 y 4, el valor mínimo del VANT pareciera mantener cierta relación con los valores físicos; aumentando el valor mínimo de la evaluación física 6 cm, el valor mínimo del VANT aumenta cerca de 2 cm. Además, observando los valores promedio, se evidencia una tendencia lógica hacia el aumento de la altura a medida que avanzan las evaluaciones (excepto las evaluaciones 4 y 6). En el caso del lote 36 en el Cuadro 4 se pueden observar los valores obtenidos, sin embargo, no se observa ningún patrón de comportamiento marcado entre la altura física y la estimada por el VANT. Se observa un crecimiento conforme avanzan las evaluaciones en el tiempo, no obstante, a diferencia del lote 7, este patrón de comportamiento es menos evidente.

**Cuadro 3.** Descriptivos de interés para la variable Altura según evaluación por tipo de medición para los datos finales del lote 7 expresado en centímetros.

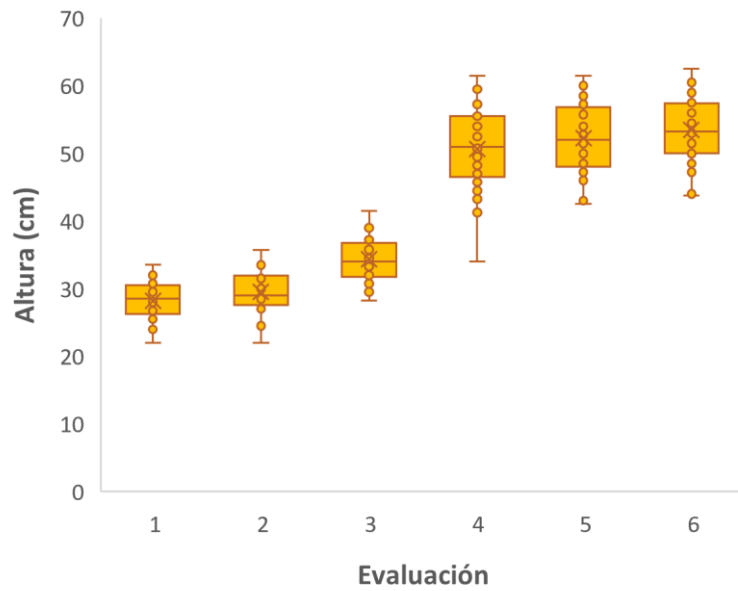
Evaluación	<i>Cantidad de plantas</i>	<i>Valor promedio</i>		<i>Valor mínimo</i>		<i>Valor máximo</i>	
	Física/VANT	Física	VANT	Física	VANT	Física	VANT
1	33	28,23	27,00	22,00	10,08	33,50	54,57
2	36	29,51	25,93	22,00	10,04	35,75	48,52
3	47	34,33	41,97	28,25	11,72	41,50	69,79
4	47	50,65	32,72	34,00	14,04	61,50	59,38
5	45	52,28	42,95	42,50	12,17	61,50	73,21
6	44	53,52	35,07	43,75	10,74	62,50	74,87

**Cuadro 4.** Descriptivos de interés para la variable Altura según evaluación por tipo de medición para los datos finales del lote 36 expresado en centímetros.

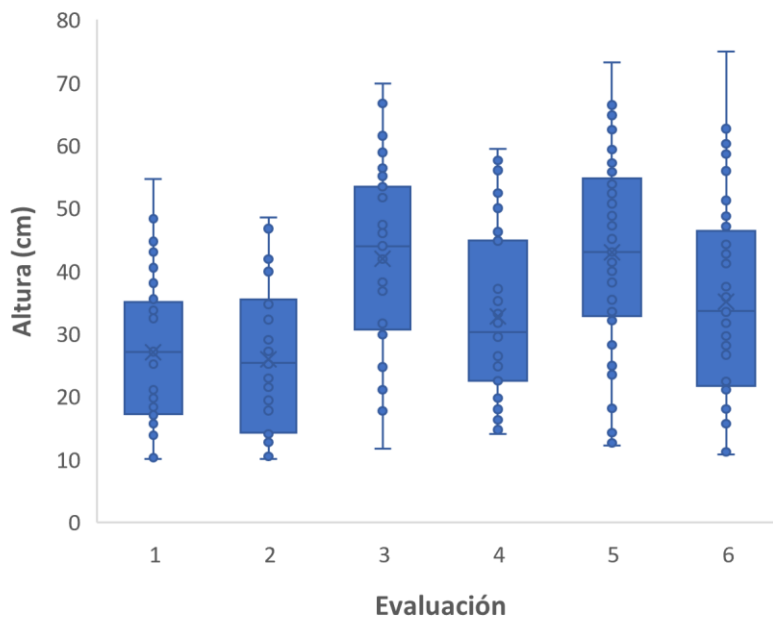
Evaluación	<i>Cantidad de plantas</i>	<i>Valor promedio</i>		<i>Valor mínimo</i>		<i>Valor máximo</i>	
	Física/VANT	Física	VANT	Física	VANT	Física	VANT
1	34	25,71	33,30	19,00	10,03	32,00	54,35
2	36	32,88	34,54	27,00	10,11	39,50	56,24
3	39	40,67	36,85	32,00	11,66	50,00	64,24
4	38	56,58	33,81	37,50	10,81	67,00	62,10
5	48	70,40	51,30	52,00	13,49	89,50	83,32
6	50	79,26	43,12	51,00	11,90	94,00	81,41
7	40	84,36	38,43	71,00	12,79	100,50	66,48
8	52	88,49	53,59	64,50	18,42	106,00	93,83
9	49	92,04	53,29	73,00	19,46	106,50	89,91
10	55	93,09	72,17	69,00	29,24	117,00	108,55
11	56	92,73	77,21	68,00	42,74	109,00	113,03

De acuerdo con los diferentes buffers utilizados para estimar la altura de planta, se puede observar en los Anexos 9, 10, 11, 12, 13 y 14 que las medidas de asociación y el coeficiente de determinación para las evaluaciones de ambos lotes relacionando la altura obtenida en campo y los datos de altura estimados mediante las fotografías aéreas, presentan valores de correlación muy bajos. De manera general, los datos obtenidos utilizando el valor mínimo de pixel presentan valores más altos que los obtenidos utilizando valor promedio de pixel y valor máximo.

En las Figuras 5 y 6, se puede observar los gráficos de cajas del lote 7 para los datos obtenidos de las mediciones de altura en campo y los datos estimados mediante fotografías aéreas, luego de la eliminación de las evaluaciones 20 y 21, ya que, en varias fechas de evaluación representaban valores atípicos. Además, se eliminaron varios datos fuera de lo normal, es decir afuera de los bigotes de las cajas. Al realizar esta eliminación, ocurre una concentración de los datos, agrupando más los datos. Las evaluaciones 1, 2 y 3 para la altura física presentan una tendencia a datos menos dispersos, mientras que las últimas tres denotan una tendencia a datos más dispersos. En cuanto a los datos estimados de altura mediante las fotografías aéreas, se puede observar en la Figura 6 que los datos demuestran una tendencia a datos más dispersos durante todas las evaluaciones.



**Figura 5.** Diagramas de caja de la variable altura para las mediciones en campo del lote 7 eliminando valores extremos.



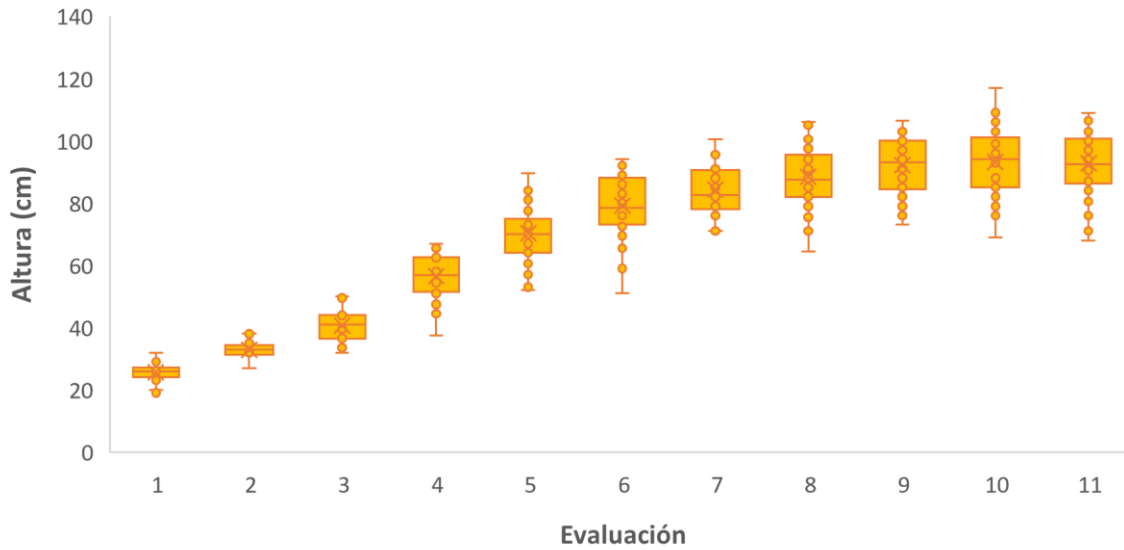
**Figura 6.** Diagramas de caja de la variable altura para valores estimados con las fotografías aéreas del lote 7 eliminando valores extremos.

En el Cuadro 5 se observan las correlaciones de los datos de altura medidos en campo con los datos estimados del lote 7, luego de la eliminación de los valores extremos. Se utilizó el valor mínimo de altura dentro de un radio de 10 centímetros a partir del centro de la planta, ya que presentó los mayores coeficientes de determinación en los datos preliminares. Para la variable altura, las evaluaciones 3, 5 y 6 presentan un mayor coeficiente de determinación eliminando estos valores extremos. Esto sugiere la presencia de valores atípicos interfiriendo en la correlación.

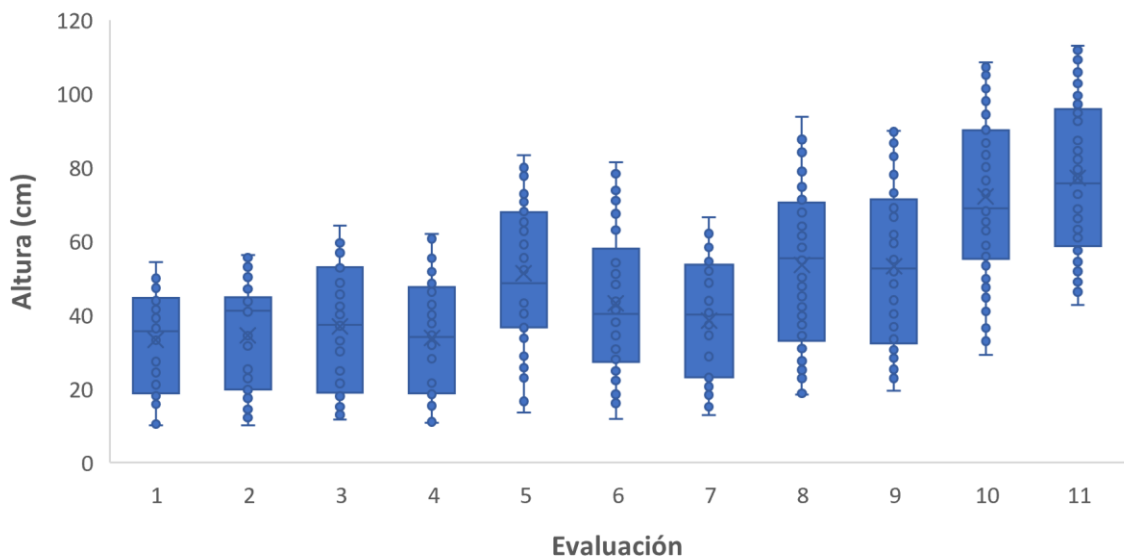
**Cuadro 5.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura entre los datos obtenidos en campo y los datos estimados de las fotografías tomadas con un VANT, elegidas para el lote 7 luego de la eliminación de los valores extremos utilizando 10 centímetros de radio y el valor mínimo de pixel.

Evaluación	Altura	
	r	r <sup>2</sup>
1	0,0348	0,0012
2	-0,0318	0,0010
3	0,1073	0,0115
4	0,0051	0,0000
5	0,2110	0,0445
6	0,1005	0,0101

En la figura 7 se muestran los diagramas de caja de los datos de altura obtenidos en campo mediante mediciones manuales para el lote 36, una vez eliminados los valores extremos. Se observa que los datos muestran una tendencia hacia la simetría. También en la Figura 8 se muestran los valores de altura estimados y luego de la eliminación de valores extremos.



**Figura 7.** Diagramas de caja de la variable altura para las mediciones en campo del lote 36 eliminando valores extremos.



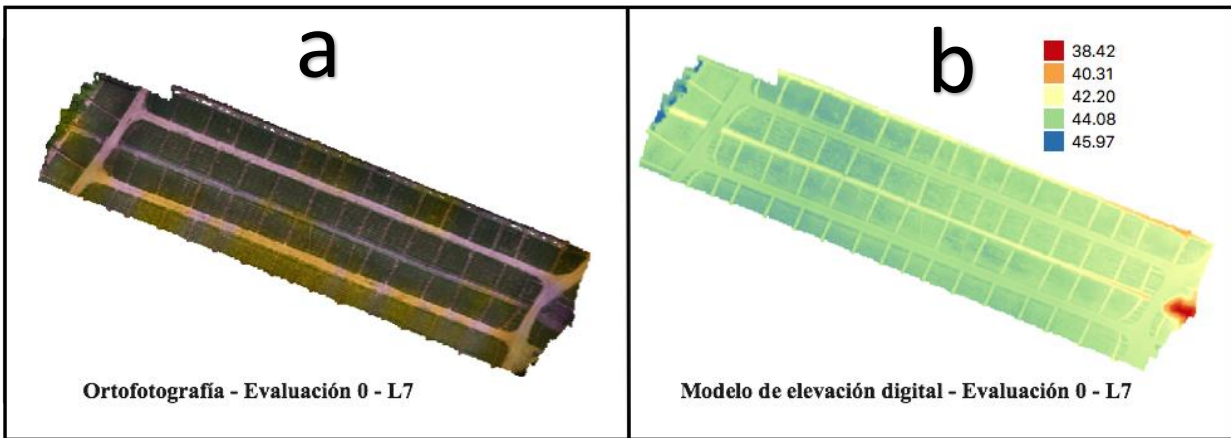
**Figura 8.** Diagramas de caja de la variable altura para los valores estimados con las fotografías aéreas para el lote 36 eliminando valores extremos.

Las correlaciones obtenidas una vez eliminados los valores extremos del lote 36, se muestran en el Cuadro 6. Se utilizó un radio de 20 centímetros y un valor de pixel mínimo por presentar las correlaciones más altas en los datos preliminares.

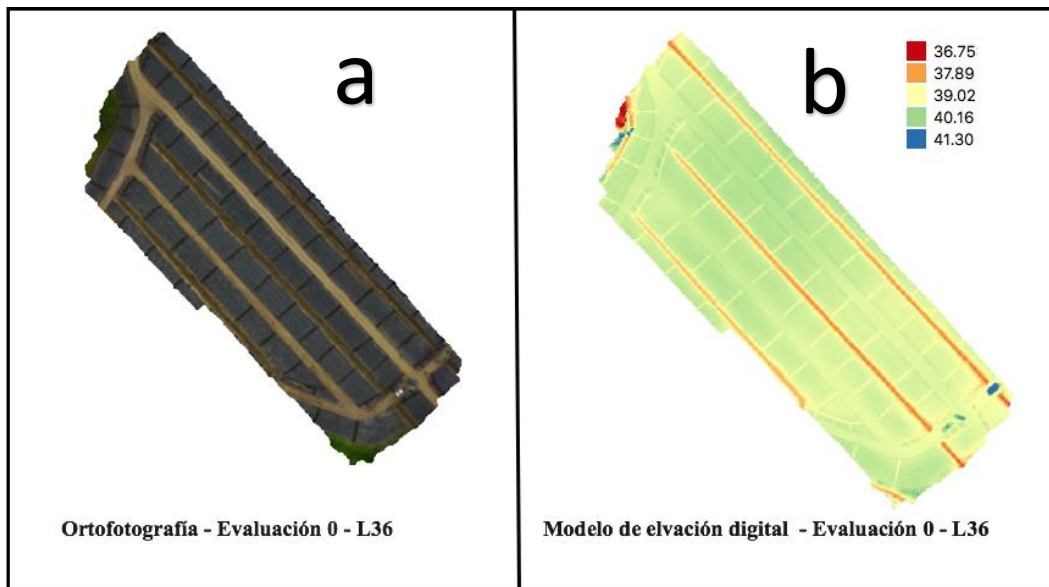
**Cuadro 6.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura entre los datos obtenidos en campo y los datos estimados de las fotografías tomadas con un VANT, elegidas para el lote 36 luego de la eliminación de los valores extremos utilizando 20 centímetros de radio y el valor mínimo de pixel.

Evaluación	Altura	
	r	r <sup>2</sup>
1	-0,0779	0,0061
2	-0,0424	0,0018
3	-0,0143	0,0002
4	-0,0064	0,0000
5	-0,0834	0,0070
6	-0,0882	0,0078
7	-0,1906	0,0363
8	-0,1906	0,0363
9	-0,0769	0,0059
10	-0,1312	0,0172
11	0,0037	0,0000

Como se puede observar en los Cuadros 5 y 6 las correlaciones entre los datos de altura obtenidos en campo y los datos estimados de las fotografías aéreas, son extremadamente bajas para ambos lotes. No obstante, observando las diferencias, se puede inferir que un factor que influye en este menor coeficiente de determinación del lote 36, es la inexactitud del modelo para estimar la altura del suelo. A diferencia del lote 7 (Figura 9), en el lote 36 se comenzó el ensayo cuando el lote todavía no presentaba cultivo (Figura 10) por lo que se realizó un modelo del lote sin cultivo. En el lote 7, se estimó este valor de altura de suelo, tomando la evaluación 0 y realizando un promedio con tres puntos tomados en la entrecalle inmediata a la planta de interés. Posteriormente se le sumaron 25 centímetros a este valor debido a que la manera convencional de sembrar la piña y en este estudio, es en camas de 20-30 centímetros de alto.



**Figura 9.** Ortofotografía (a) y modelo de elevación digital (b), utilizados como línea base de altura (Evaluación 0) para el lote 7.



**Figura 10.** Ortofotografía (a) y modelo de elevación digital (b) utilizados como línea base de partida (Evaluación 0) para el lote 36.

Según el U.S. Geological Survey (1997), el error presente en un modelo de elevación digital se distribuye en tres grupos. Los primeros son sistemáticos, los cuales se asocian al procedimiento de generación del DEM, es decir, errores en la metodología del procesamiento de las imágenes. Los errores "blunders" los cuales se podrían traducir a errores metodológicos, se eliminan en la revisión preliminar de los datos, antes de iniciar con el procesamiento de las imágenes. Por último, el tercer grupo de errores son los aleatorios los cuales se mantienen luego



de eliminar los "blunders" y sistemáticos. De acuerdo con la metodología seguida en este trabajo, los errores asociados a los modelos de elevación digital se califican como errores aleatorios.

Por otra parte, la arquitectura de la planta, alta densidad de siembra, incidencia de radiación solar y el error asociado a los modelos, influyen a la hora de realizar la correlación. Se cree que debido a la arquitectura propia de la planta de piña (semejante una macolla) la estimación realizada por el programa se ve influenciada por los puntos extremos de la planta (más altos y bajos), dando como resultado valores no representativos a lo real. En el lote 7, en los Anexos 9, 10 y 11, donde el radio de 1 centímetro y 20 centímetros, obtienen una menor correlación que el radio intermedio de 10 centímetros, se observa este efecto. También, la alta densidad de plantas utilizada por hectárea (65000 a 70000) incide en que las plantas se traslapen y se incurra en un error al tomar hojas no propias de la planta a la hora de estimar los valores. Lo anterior se puede corroborar en el Anexo 12 donde utilizando un radio de 20 centímetros para cada punto por planta, la correlación es más baja que utilizando 1 y 10 centímetros. No obstante, en el lote 36 no se observa lo mismo. En los Anexos 13, 14 y 15 se observa una tendencia hacia mayores correlaciones conforme se utiliza un radio mayor. Se cree que esta baja correlación en el lote 36 se debe principalmente a la imprecisión del modelo de la evaluación 0 utilizado para determinar la altura de planta. Además la alta incidencia de radiación produce un efecto muy notorio de sombras, las cuales podrían influir en la precisión del programa. Por último, el error asociado a los puntos de control en cada uno de los modelos, influyen añadiendo o restando un promedio de 3,7 centímetros en cada estimación (Cuadro 13). Es importante mencionar que otro factor que podría influir en la imprecisión del modelo del lote 36 es la utilización de plástico negro en las camas de siembra y por ende el brillo a la hora de recibir radiación.

Según Moeckel, *et al.*, (2018) existen factores climáticos que pueden influir en la precisión de los datos estimados. Entre ellos se encuentran las nubes que pueden la afectar la creación de la nube densa y provocar errores en el modelo y el viento el cual puede mover las hojas de la planta y afectar a la hora de estimar la altura mediante el DEM. De acuerdo con lo observado en esta investigación, el efecto del viento se puede considerar inexistente ya que debido a la arquitectura de la planta y su alta rigidez en las hojas es poco probable que durante los vuelos haya existido un gran movimiento de estas y por ende un error. En cuanto al error que podría

existir debido a las nubes, se considera altamente probable debido a las condiciones climáticas de la zona. En esta región es común tener eventos de lluvia seguidos de una alta incidencia solar y viceversa. Además de los cambios mencionado de la incidencia del sol, también tiene un papel importante el ángulo de incidencia de la radiación ya que afecta las estimaciones del programa y mediciones del ceptómetro en campo. Se debe de tomar en cuenta ya que durante este trabajo, debido a las condiciones climáticas propias de la zona y le gran variabilidad del clima, los vuelos se realizaron a diferentes horas, dependiendo de las condiciones climáticas el día de la evaluación.

Como se mencionó anteriormente, otro aspecto que podría haber influenciado a la hora de la generación del modelo y por ende la baja correlación de los datos en todas las evaluaciones es el traslape y arquitectura de la planta. Esto lo respaldan Harwin y Lucieer (2018) quienes indican que en cultivos donde la vegetación es muy densa o compleja, especialmente por el traslape entre hojas, se da una muy mala generación de la nube de puntos. Esto resulta en un modelo no representativo a la realidad. Además, Huang *et al.*, (2019) mencionan que la altura normalmente es subestimada por los modelos generados con las fotografías aéreas. Esto es acorde con esta investigación donde se observó que los datos estimados son inferiores a los medidos en campo.

#### *Relación entre el índice de vegetación GRVI y el IAF*

En los Cuadros 7 y 8 se pueden observar los descriptivos de interés para la variable IAF/GRVI según evaluación por tipo de medición para los datos finales del lote 7 y 36 respectivamente. Para el lote 7, en el Cuadro 7 se puede observar un aumento a medida que se realizan las evaluaciones. No obstante, en la evaluación, los datos estimados de GRVI promedio sugieren algún tipo de error que disminuye la suma de valores del GRVI utilizando 20 centímetros de radio. El lote 36 presenta un comportamiento similar (Cuadro 8) y al igual que lote 7, presenta valores atípicos en las evaluaciones 6 y 11. El hecho de presentar la evaluación 6 en ambos lotes valores atípicos, sugiere la influencia de algún aspecto climático en los modelos realizados ese día. Como se indica en este trabajo, las condiciones climáticas pueden tener una influencia negativa en la generación de los modelos.

**Cuadro 7.** Descriptivos de interés para la variable IAF/GRVI según evaluación por tipo de medición para los datos finales del lote 36.

Evaluación	Cantidad de plantas	Valor promedio		Valor mínimo		Valor máximo	
	IAF/GRVI	IAF	GRVI	IAF	GRVI	IAF	GRVI
1	47	2,18	111,59	1,52	42,62	2,93	153,85
2	47	2,37	145,07	1,26	74,34	3,41	193,06
3	45	3,14	188,85	1,34	92,38	4,35	254,17
4	46	4,91	266,59	1,48	85,32	8,43	432,93
5	41	5,02	310,53	2,50	181,66	7,36	414,55
6	48	5,89	191,80	2,53	112,66	7,95	275,38

**Cuadro 8.** Descriptivos de interés para la variable IAF/GRVI según evaluación por tipo de medición para los datos finales del lote 36.

Evaluación	Cantidad de plantas	Valor promedio		Valor mínimo		Valor máximo	
	IAF/GRVI	IAF	GRVI	IAF	GRVI	IAF	GRVI
1	57	0,58	138,27	0,28	37,22	1,01	276,70
2	57	0,64	159,30	0,31	78,33	1,05	240,81
3	57	1,02	248,36	0,56	112,23	1,76	842,34
4	57	1,68	663,88	0,85	213,52	3,62	1168,32
5	57	1,76	804,83	0,64	370,85	3,33	1178,40
6	34	1,87	571,10	1,19	189,05	2,63	1071,12
7	57	3,43	739,52	1,07	180,47	5,36	2306,73
8	57	2,49	1712,38	1,58	1069,26	3,53	2390,98
9	57	4,41	1826,45	1,76	865,50	6,63	2624,57
10	57	3,65	2026,72	1,96	1226,75	5,16	2766,04
11	35	4,99	1951,72	2,74	1325,64	6,24	2782,82

En el Cuadro 9 se pueden observar las medidas de asociación y el coeficiente de determinación del lote 7 para las medidas de IAF/GRVI utilizando los tres diferentes radios de 5, 10 y 20 centímetros. Con excepción de la evaluación 1 y 6, los valores obtenidos utilizando un radio de 20 centímetros presentan mejor coeficiente de determinación. No obstante, al igual que los resultados obtenidos con la altura, los coeficientes de determinación son muy bajos, siendo la evaluación 2 con 20 centímetros de radio la que presenta un mayor  $r^2$  con un valor de 0,1071. Este valor se considera como una correlación muy baja. Al igual que el lote 7, los resultados obtenidos del lote 36 (Cuadro 10) son mayores al utilizar 20 centímetros de radio. Se puede observar que las evaluaciones 5 y 8 presentan los mayores coeficientes de determinación con valores de  $r^2= 0,1220$  y  $r^2= 0,1791$ .

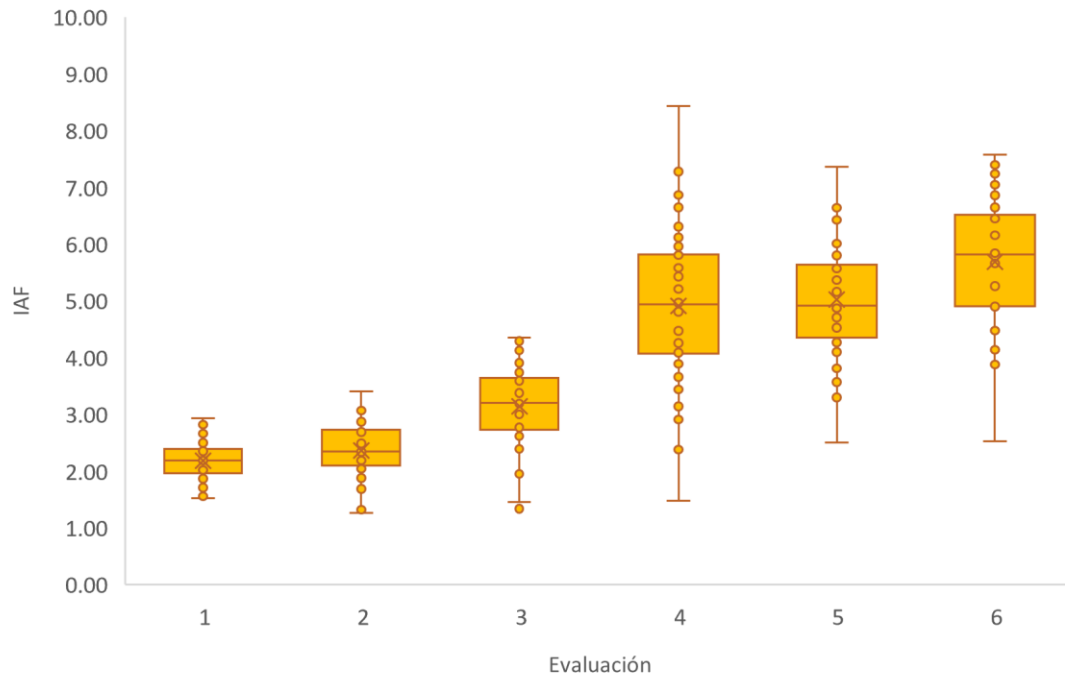
**Cuadro 9.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación para las medidas de IAF/GRVI según radio para el lote 7.

Evaluación	5 cm		10 cm		20 cm	
	$r$	$r^2$	$r$	$r^2$	$r$	$r^2$
1	-0,1463	0,0214	-0,1062	0,0113	-0,0413	0,0017
2	0,1747	0,0305	0,2268	0,0514	0,3272	0,1071
3	0,1705	0,0291	0,2184	0,0477	0,2305	0,0531
4	0,1266	0,0160	0,0667	0,0044	0,1309	0,0171
5	0,0917	0,0084	0,1799	0,0324	0,2687	0,0722
6	-0,1796	0,0323	-0,0678	0,0046	0,0839	0,0070

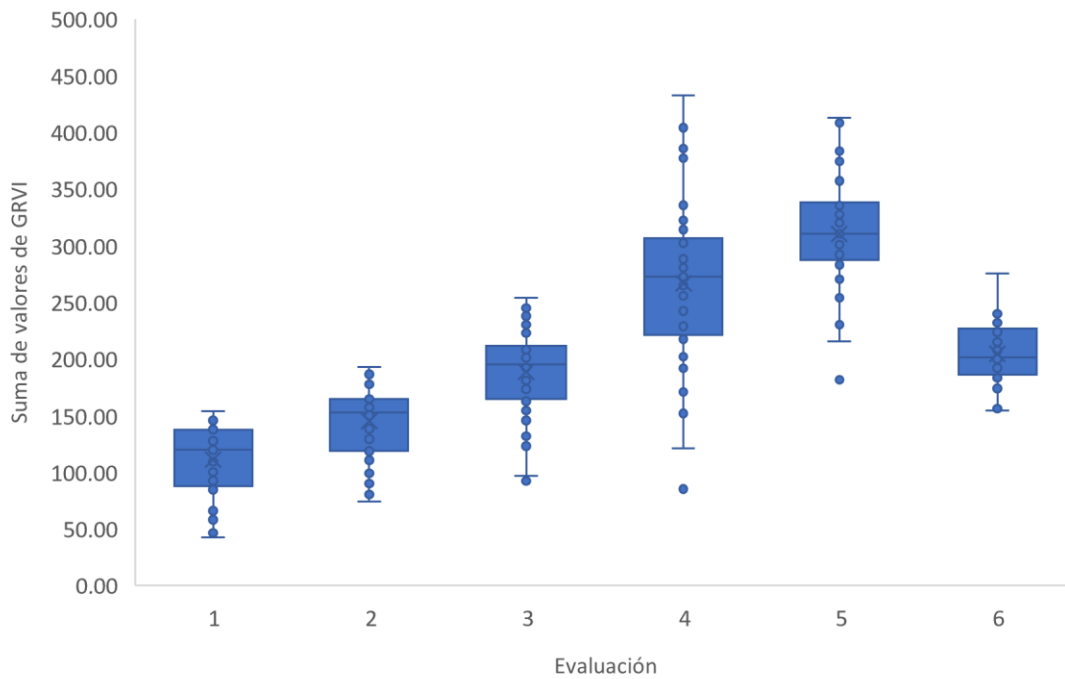
**Cuadro 10.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación para las medidas de IAF/GRVI según radio para el lote 36.

Evaluación	5 cm		10 cm		20 cm	
	$r$	$r^2$	$r$	$r^2$	$r$	$r^2$
1	0,0389	0,0015	0,0048	0,0000	-0,0663	0,0044
2	0,0074	0,0001	-0,0175	0,0003	0,0459	0,0021
3	-0,0276	0,0008	-0,1244	0,0155	-0,0176	0,0003
4	0,0630	0,0040	0,0290	0,0008	0,0355	0,0013
5	0,2315	0,0536	0,2637	0,0695	0,3493	0,1220
6	0,0275	0,0008	-0,0502	0,0025	0,2635	0,0694
7	0,1640	0,0269	0,2098	0,0440	0,2122	0,0450
8	-0,0188	0,0004	0,1494	0,0223	0,4232	0,1791
9	0,0619	0,0038	0,1476	0,0218	0,2386	0,0570
10	0,1794	0,0322	0,1149	0,0132	0,1812	0,0328
11	-0,1168	0,0136	-0,1068	0,0114	-0,0441	0,0019

Las Figuras 11 y 12 muestran los diagramas de caja para los datos obtenidos de las mediciones manuales de IAF y el GRVI estimado mediante las fotografías aéreas para el lote 7 luego de la eliminación de valores extremos. Se observa una tendencia de los datos estimados (Figura 12) hacia la asimetría mientras que los datos manuales de IAF (Figura 11) presentan una tendencia hacia conjuntos de datos más simétricos. Al eliminar los valores extremos, en la evaluación manual la cantidad de valores extremos se reduce a uno mientras que en los datos estimados se reduce a tres; la cantidad de valores extremos antes de esta eliminación fue de 8 en ambos casos.

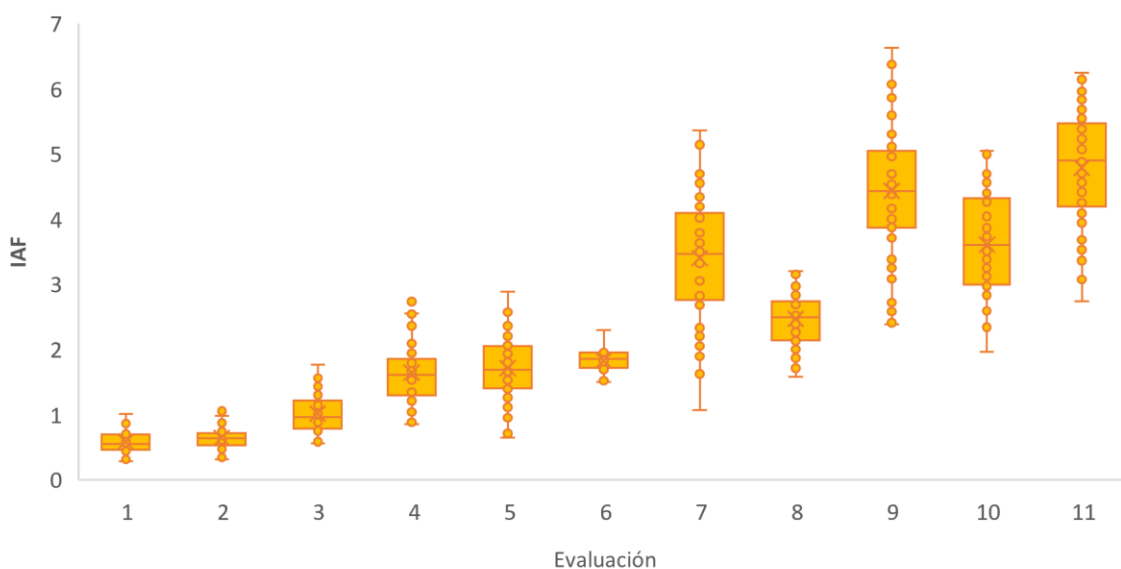


**Figura 11.** Diagramas de caja de la variable índice de área foliar para las mediciones físicas del lote 7 una vez eliminados los valores extremos.

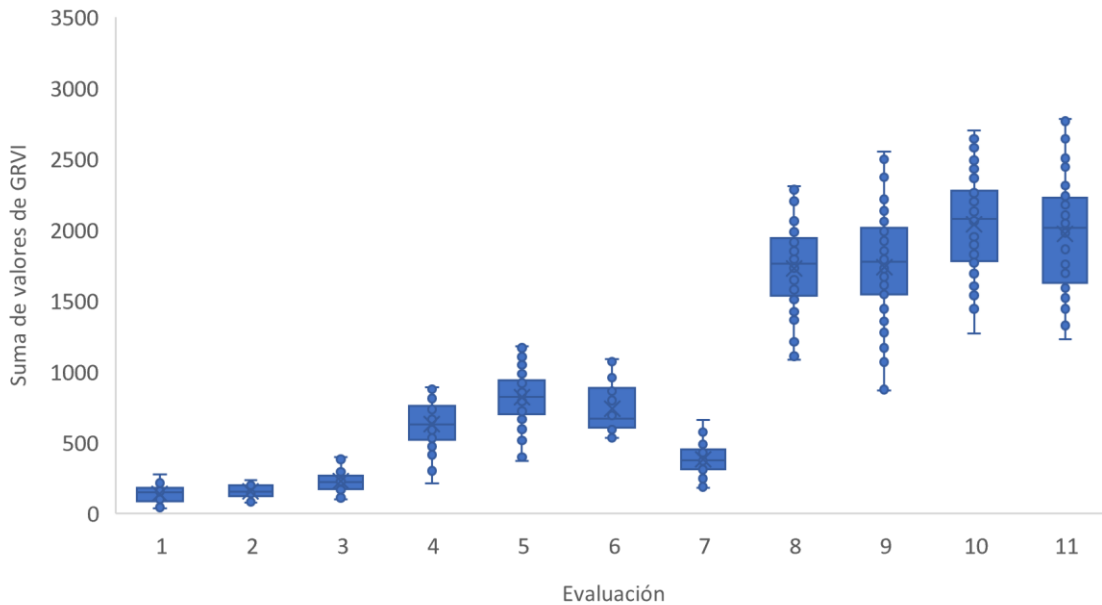


**Figura 12.** Diagramas de caja de la variable GRVI para los datos estimados de las fotografías aéreas del lote 7 una vez eliminados los lotes extremos.

Los diagramas de cajas en las Figuras 13 y 14 muestran los datos obtenidos en campo del lote 36, de IAF y los datos estimados de GRVI mediante las fotografías aéreas respectivamente. Se encuentra una tendencia a datos más dispersos conforme se avanza en las evaluaciones para ambos sets de datos. A partir de la evaluación 7 para el caso del IAF y la evaluación 8 para el GRVI se observa que las cajas aumentan en tamaño, sugiriendo una mayor variabilidad de los datos. Además, una vez realizada la primera eliminación de valores extremos, no hay presencia de nuevos valores extremos dentro de cada evaluación.



**Figura 13.** Diagramas de caja de la variable índice de área foliar para las mediciones físicas del lote 36 una vez eliminados los lotes extremos.



**Figura 14.** Diagramas de caja de la variable GRVI para los datos estimados de las fotografías aéreas del lote 36 una vez eliminados los lotes extremos.

Basados en las Figuras 11, 12, 13 y 14 queda en evidencia una tendencia a datos con mayor variabilidad conforme se avance en las evaluaciones, sugiriendo que una mayor cobertura foliar distorsiona tanto los datos medidos en campo como los estimados mediante las fotografías. Como se ha mencionado, en el lote 7 se comenzó el ensayo cuando la plantación tenía 4 meses después de siembra mientras que en el 36 se empezó antes de la siembra. Esto quiere decir que la evaluación 1 del lote 7 se podría comparar en términos de edad de plantación con la evaluación 8 del lote 36. Lo anterior se podría atribuir al efecto que el traslape de hojas y sombras resultantes de este traslape, causan sobre la medición manual y la estimación mediante las fotografías.

El índice más utilizado para estimar parámetros del cultivo es el NDVI. Este índice utiliza espectros rojo e infrarrojo, siendo este último el que detecta el contenido de clorofila el cual está relacionado directamente con el estado vegetativo (Rouse *et al.*, 1973). Una desventaja en la practicidad de este índice es la necesidad de una cámara multispectral, la cual tiene un costo elevado que se encuentra entre los \$2000 y \$10000 dólares. Por otra parte, las ventajas son que



se encuentran gran cantidad de estudios utilizando este índice y su aplicabilidad es muy amplia, al igual que su confiabilidad.

No se ha encontrado ningún estudio en cuanto a la correlación entre IAF y GRVI en el cultivo de la piña. No obstante, en numerosos estudios se ha correlacionado el GRVI con el NDVI, obteniendo coeficiente de determinación muy satisfactorios (Anderson *et al.*, 2016). Muy similar a lo realizado en este estudio, en varios de estos estudios, se utilizó un VANT con cámara RGB para obtener las ortofotografías y mediante la ecuación (1) estimar el GRVI. Posteriormente, utilizando imágenes del Satelite Landsat 8, 2015, se estimó el NDVI.

Xavier y Vettorazzi (2004) relacionaron el índice de área foliar con el NDVI. Los investigadores obtuvieron un  $r^2$  de 0,57 a 0,72 en las cuatro fechas de evaluación. Los autores, utilizaron un LAI-2000 Plant Canopy Analyzer que es un ceptómetro de la misma casa comercial que el utilizado en este ensayo. Además para la obtención del NDVI, utilizaron imágenes satelitales del Landsat 7.

En este trabajo se relacionó el GRVI con LAI para encontrar la relación entre los datos. De manera convencional es sumamente práctico el poder conocer con certeza el índice de área foliar o el índice de vegetación, siendo el último el más práctico debido a la facilidad de adquisición de un VANT con cámara RGB. Los datos obtenidos indican que no existe una correlación alta entre los datos obtenidos con el VANT y los datos de índice de área foliar obtenidos con el ceptómetro en campo. Se cree que la diferencia se encuentra en la forma en que el ceptómetro estima el IAF. Como se mencionó en la metodología, el GRVI utiliza las bandas verde y roja, mientras que el IAF utiliza el rojo e infrarrojo cercano.

Anderson *et al.*, (2016) correlacionaron diferentes índices de vegetación con el NDVI, dando el mejor resultado el GRVI. No obstante, pareciera no haber ninguna relación entre los valores de IAF obtenidos y los valores de GRVI estimados de los ortomosaicos.

Se podría inferir que la correlación del NDVI estimado de imágenes aéreas y el IAF en piña, tendría una alta correlación, sin embargo, debido a factores mencionado en este trabajo (alto costo de una cámara multispectral, dificultad de acceso, entre otros) no fue posible estimar este índice.

## Modelos digitales de terreno y ortomosaicos

Otra posible explicación para los bajos coeficientes de determinación obtenidos se puede atribuir a los errores intrínsecos de los modelos generados por el programa con las fotografías aéreas. En el Cuadro 11 se pueden observar los errores de los modelos generados en ambos lotes durante cada evaluación siendo el de la evaluación 7 del lote 36, el que presenta mayor error con un valor de 9,9 centímetros. Todos los modelos generados en Agisoft Photoscan™ tienen un error asociado, el cual, para efectos de esta investigación, se pretende que sea lo más bajo posible. Este error ocurre debido a la diferencia entre la georreferenciación de los puntos de control que se marcan manualmente en cada fotografía (tomados en campo con la estación topográfica) y la georreferenciación que presentan estos puntos en cada fotografía (Agisoft LLC, 2019). A diferencia de la evaluación 7 del lote 36, los demás modelos tienen un error por debajo de los 6,7 centímetros. En promedio el error de los modelos es de 3,14 centímetros.

**Cuadro 11.** Características de los modelos digitales de superficie generados en Agisoft Photoscan™ para cada una de las evaluaciones de los lotes 7 y 36.

<b>Evaluación (Lote 7)</b>	<b>Error</b>	<b>Evaluación (Lote 36)</b>	<b>Error</b>	<b>Evaluación (Lote 36)</b>	<b>Error</b>
0	6,7	0	1,8	7	9,9
1	1,6	1	3,2	8	1,9
2	3,2	2	2,4	9	2,6
3	3,8	3	6,5	10	2,3
4	1,3	4	2,6	11	2,6
5	0,5	5	2,4		
6	1,1	6	3,3		

El error asociado a los modelos se atribuye a tres aspectos. El primero es el error asociado a la creación de los modelos, el cual es inherente a estos, razón por la cual no se puede eliminar del todo. El segundo aspecto, el cual se refleja en errores superiores a 4 centímetros es que se

incurrió en un error experimental durante las primeras semana del ensayo, donde debido a las fuertes lluvias y por ende el gran deterioro de los caminos, se utilizaron tractores de oruga para reparar los mismos, por lo que todos los puntos de control se movieron. Esto se puede evidenciar en la evaluación 3 del lote 36 donde el error incrementa a 6,5 centímetros.

Es importante recalcar que la precisión de la estación topográfica total puede llegar a ser milimétrica, por lo que es de gran importancia que estos puntos de control se mantengan inmóviles durante todo el ensayo. Después de la evaluación tres, se volvieron a marcar y tomar los puntos de control con la estación total. No obstante, en las evaluaciones posteriores, debido a efectos atmosféricos (onda tropical) y el tránsito de los tractores y equipos pesados se cree que hubo un ligero movimiento de algunos puntos de su lugar. Esto se evidencia en la evaluación 7 del lote 36. Posterior a esta evaluación se dejaron de utilizar dos puntos de control debido a su desplazamiento y por ende alto error asociado.

El tercer aspecto es la precisión a la hora de marcar el punto de control en las fotografías. En algunas evaluaciones debido a la claridad de las imágenes (alta incidencia de luz solar) se dificultó la identificación correcta de estos puntos. Además, debido a los movimientos propios del VANT, existen fotografías donde se observan los puntos “movidos” lo cual también dificulta la identificación de estos. No obstante, utilizando la función de “Adaptive Camera Model Fitting” que presenta Agisoft, se logró reducir el error a menos de 10 centímetros lo cual es suficiente para trabajar y estimar parámetros en la agricultura. Este modelo de cámara adaptativo permite la selección automática de parámetros de la cámara para ser utilizados por el programa y así reducir la distorsión radial y tangencial (Agisoft LLC, 2019).

## Modelos estadísticos

En los anexos 16 y 17 se presentan los diagramas de dispersión de los promedios de los datos de altura física vs altura estimada e IAF vs GRVI estimado. Se presenta una línea de regresión preliminar que se determinó a continuación.

Para los datos obtenidos de altura física y altura estimada mediante las fotografías aéreas para el lote 36, se utilizaron los criterios mostrados en el Cuadro 12 para determinar si el modelo lineal funciona o no. Se puede observar que, al realizar el análisis de la variable independiente, la probabilidad asociada de la medición de la altura estimada mediante las fotografías aéreas durante todas las evaluaciones tiene un valor de 0,0081. Debido a esto, se rechaza la hipótesis nula de que la variable es igual a 0, siendo la variable significativa. Además se realizaron los supuestos de normalidad y homoscedasticidad, utilizando la prueba de Shapiro-Wilks y Breusch-Pagan respectivamente. En el Cuadro 12 se detalla la probabilidad asociada obtenida al aplicar la prueba de Shapiro-Wilks (0,7375) por lo que no se rechaza la hipótesis nula de que la muestra proviene de una población normalmente distribuida y se concluye que los residuales tienen una distribución normal. En cuanto a la prueba de Breusch-Pagan, el resultado de la probabilidad asociada es de 0,3351 por lo que no rechaza la variancia constante de los residuales del modelo y se asume la homoscedasticidad de este. Por último, el coeficiente de determinación indica que el modelo explica un 55,96% de la variabilidad total de la altura física. Además se realizó la prueba F al modelo dando un nivel de significancia de 0,0081.

**Cuadro 12.** Criterios de información del modelo sobre la altura de las plantas.

<b>Criterio</b>	<b>Valor p</b>
<u>Variables</u>	
Altura drone.....	0,0081
<u>Supuestos</u>	
Normalidad.....	0,7375
Homoscedasticidad.....	0,3351
<u>Predicción</u>	
Coef de determinación.....	0,5596

El modelo generado es el siguiente:

$$(3) \text{fis} = \beta_0 + \beta_1 \cdot \text{VANT}$$

En donde:

$\beta_0$ : Intercepto del modelo

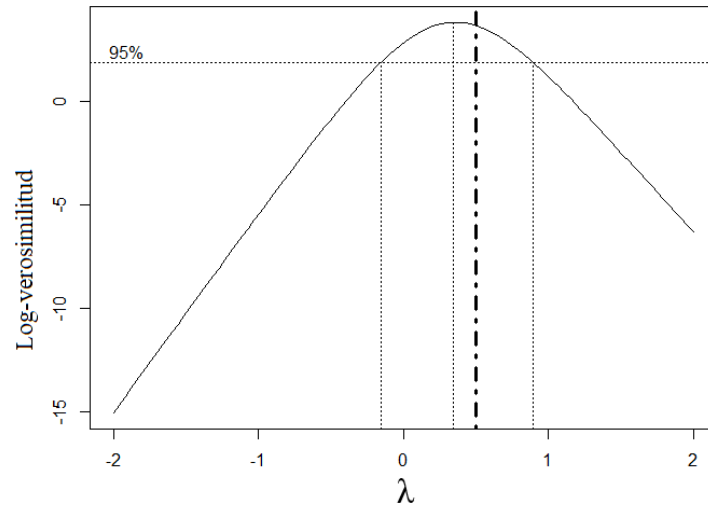
$\beta_1$ : Coeficiente asociado a la medición de la altura mediante el VANT

Los coeficientes estimados del modelo son: 8,8616 para el intercepto y 1,2485 para el asociado a la altura del VANT.

La ecuación generada para el modelo anterior es la siguiente:

$$(4) \text{fis} = 8.8616 + 1,2485 \cdot \text{VANT}$$

Para los datos obtenidos de IAF/GRVI se realizó un primer modelo mostrado en el Anexo 15. En este se pueden observar los criterios de información del modelo de IAF original. Sin embargo, debido a que existe una caída atípica en la evaluación 7 y se esperaría que los datos vayan, en promedio aumentando, se procedió a transformar la variable respuesta mediante una transformación de BoxCox (Figura 15). El lambda indica que valores entre 0 y casi 1 pueden maximizar la verosimilitud, por lo que se elige un valor que permita una transformación adecuada y si elevamos la variable respuesta a la 0,5 es como aplicarle una función de raíz cuadrada, por lo que se opta por esa.



**Figura 15.** Gráfico de BoxCox utilizado para transformar la variable respuesta.

En el cuadro 13 se pueden observar los criterios de información del modelo sobre el índice de área foliar utilizando la variable "Dummy". Se puede observar, después de la transformación, que la probabilidad asociada de la medición del GRVI es cercana a cero por lo que se rechaza la hipótesis nula y la variable se considera significativa. Además, se realizaron los supuestos de normalidad y homoscedasticidad, utilizando la prueba de Shapiro-Wilks y Breusch-Pagan respectivamente al modelo mostrado en el Cuadro 13. Ahí se detalla el valor de la probabilidad asociada obtenido al aplicar la prueba de Shapiro-Wilks (0,9162) por lo que no se rechaza la hipótesis nula y se concluye que los residuos tienen una distribución normal. En cuanto a la prueba de Breusch-Pagan, el resultado es de 0,1705 por lo que no rechaza la hipótesis de variancia constante de los residuales del modelo y se asume la homoscedasticidad de este. Por último, el coeficiente de determinación indica que el modelo explica un 90,20% de la variabilidad total del índice de área foliar. Además, al igual que con la altura, se realizó la prueba F al modelo y dio un nivel de significancia de 0,00016.

**Cuadro 13.** Criterios de información del modelo sobre el índice de área foliar.

<b>Criterio</b>	<b>Valor p</b>
<u>Variables</u>	
GRVI.....	<0,0000
Dummy.....	0,0027
<u>Supuestos</u>	
Normalidad.....	0,9162
Homoscedasticidad.....	0,1705
<u>Predicción</u>	
Coef de determinación.....	0,9020

El modelo generado es el siguiente:

$$(5) iaf = \beta_0 + \beta_1 \cdot grvi + \tau \cdot exp$$

En donde:

$\beta_0$ : Intercepto del modelo

$\beta_1$ : Coeficiente asociado al valor de grvi

$\tau$ : Coeficiente asociado a la variable dummy

Los coeficientes estimados del modelo son: 0,7901 para el intercepto, 0,0006 para el grvi y de 0,8142 para el coeficiente asociado a la variable dummy.

La ecuación del modelo generado es la siguiente:

$$(6) iaf = 0,7901 + 0,0006 \cdot grvi + 0.8142 \cdot exp$$

Los resultados obtenidos mediante los modelos mencionados anteriormente van en concordancia con las investigaciones revisadas para la generación de este trabajo. Se puede observar que la arquitectura de la planta, densidad de siembra y demás factores mencionados, tienen un efecto sobre la estimación de la altura mediante las fotografías aéreas. Esto se evidencia en el bajo coeficiente de determinación obtenido para la estimación de la altura mediante el modelo y los bajos  $r^2$  que se observan al correlacionar los datos obtenidos en campo y los datos estimados mediante las fotografías. Por otro lado, los datos de IAF/GRVI parecen no estar tan influenciados por estos factores y se evidencia en el coeficiente de determinación del modelo (0.9020) y los  $r^2$  de los datos utilizando el promedio. Cabe recalcar que en la utilización de estos modelos se debe de tomar en cuenta las plantas eliminadas, ya que esto influye en un porcentaje de plantas que el modelo dejará por fuera. Sin embargo, los resultados obtenidos son sumamente alentadores y para realizar un control de crecimiento/salud de la plantación es una herramienta sumamente eficiente y de bajo costo.



## Conclusiones

- En el presente trabajo se cumplió con los objetivos planteados, demostrando las correlaciones entre los datos medidos en campo y los datos estimados mediante fotografías aéreas de altura de planta e índice de área foliar/GRVI. Además se realizaron dos modelos con los cuales se puede estimar la altura de planta e índice de área foliar con los datos obtenidos mediante las fotografías aéreas.
- El modelo generado para la estimación del IAF, permite explicar un 90,20% la variabilidad total de los datos de IAF. Se requirió la utilización de una variable denominada "Dummy" en este estudio debido al reconocimiento de un error en los datos debido a los efectos mencionados anteriormente en este documento. No obstante, al igual que el modelo generado para estimar la altura, este modelo proporciona un resultado alentador y una base de partida sólida en donde iniciar con estudios más profundos del tema.
- El modelo generado para la estimación de la altura permite explicar un 55,96% de la variabilidad total de la altura física. Si bien se esperaba un mayor coeficiente de determinación, es un dato alentador y una buena base de partida para los siguientes ensayos que busquen abordar este tema.
- Las correlaciones obtenidas (dato por dato) utilizando la metodología descrita en este trabajo no son satisfactorias. El principal factor al cual se le atribuye esta baja correlación es la imprecisión del modelo generado debido a la arquitectura propia de la planta de piña (*Ananas comosus*), la alta densidad de siembra utilizada, efectos climáticos como el ángulo de incidencia de la luz y la radiación incidente. Si bien diferentes autores respaldan la precisión de esta metodología para diferentes cultivos, en esta investigación no se obtuvieron los resultados esperados.

- Si bien la correlación para el lote 7 utilizando los promedios por evaluación para el IAF/GRVI es satisfactoria ( $r^2 > 0,7$ ) la desviación estándar de los datos no permite utilizar estos datos como referencia del IAF de la plantación durante las primeras semanas del cultivo. No obstante, durante las últimas dos evaluaciones, la desviación es inferior al 20% por lo que en términos prácticos se podría utilizar como un indicador del estado de la plantación.
- La correlación utilizando promedios por evaluación para el lote 36 es satisfactoria tanto para altura  $r^2 = 0,74$  como para IAF/GRVI  $r^2 = 0,87$ . No obstante, se observa en el Cuadro 4 que la desviación de los datos promedio es en términos generales superior a la del lote 7.

## Recomendaciones

- Es necesario profundizar en el tema y utilizar la metodología descrita en este trabajo nuevamente para comprobar su funcionalidad en el cultivo de piña (*Ananas comosus*).
- Utilizar la misma metodología en una parcela de investigación con una densidad de siembra cerca de 35,000 plantas (la mitad de la utilizada en este trabajo) por hectárea para corroborar el efecto de una alta densidad de siembra sobre la generación de los modelos.
- Realizar, en la medida de lo posible, los vuelos y mediciones del ceptómetro a la misma hora y bajo condiciones similares de luminosidad en cada evaluación.
- Valorar una posible modificación de la metodología para realizar vuelos semanas y tener una mayor cantidad de datos y una mejor continuidad de la curva de crecimiento del cultivo.
- Cambiar la distribución de los puntos de control en el perímetro y valorar la inclusión de estos dentro de la plantación; asegurarse que estos puntos no se muevan durante la duración completa del ensayo.
- Considerar la utilización de cámaras multiespectrales para corroborar la alta correlación entre los datos de GRVI y NDVI mencionada en este trabajo, además de aportar un rango más amplio de información (estrés del cultivo, enfermedades, entre otros).
- Investigar la relación entre la altura estimada/GRVI con el peso de la planta para determinar la posibilidad de tomar la decisión de inducción floral basados en datos obtenidos de imágenes aéreas.

- Analizar otros modelos que expliquen mejor la relación entre las imágenes y los valores reales de altura así como el GRVI e IAF.

## Bibliografía

- Adamchuk, V. I; Ferguson, R. B; Hergert, G. W. 2010. Soil Heterogeneity and Crop Growth. En: Oerke, EC; Gerhards, R; Menz, G; Sikora, R. Precision Crop Protection – the Challenge and Use of Heterogeneity. Dordrecht, Holanda, Springer. p. 3-16.
- Agisoft LLC. 2019. Agisoft Metashape User Manual: Professional Edition, version 1.5.
- Ahmadi, A; Tong, P.S; Casey, N.G. 2015. The MD-2 "Super Sweet" pineapple (*Ananas comosus*). Utar Agricultural Science Journal 1(4):14-17.
- Anderson, H; Nilsen, L; Tommervik, H; Rune, S; Nagai, S; Cooper, E. 2016. Using Ordinary Digital Cameras in Place of Near-Infrared Sensors to Derive Vegetation Indices for Phenology Studies of High Arctic Vegetation. Remote Sensing 8(10): 847.
- Aravena, J. 2005. La Expansión Piñera en Costa Rica: La realidad de los perdedores de la agroindustria exportadora de piña. COECOceiba, San José, CR. 56 p.
- Atzberger, C. 2013. Advances in remote sensing agriculture: context description, existing operational monitoring systems and major information needs. Remote Sensing, 5(2): 949-981.
- Bartholomew, D. 2014. History and Perspectives on the Role of Ethylene in Pineapple Flowering. International Symposium on Plant Bioregulators in Fruit Production XII, 2014, Orlando, Estados Unidos. S.I., International Society of Horticultural Sciences. S.p.
- Bartholomew, D. P; Paull, R.E; Rohrbach, K.G. 2002. The Pineapple: Botany, production and uses. Londres, Reino Unido, CABI. 320 p.

- Bendig, J; Bolten, A; Bennertz, S; Broscheit, J; Eichfuss, S; Bareth, G. 2014. Estimating Biomass of Barley Using Crop Surface Models (CSMs) Derived from UAV-Based RGB Imaging. *Remote Sensing* 6(11): 10395-10412.
- Bendig, J; Willkomm, M; Tilly, N; Gnyp, L; Bennertz, S; Qiang, C; Miao, Y; Lenz-Wiedmann, V.I.S; Bareth, G. 2013. *International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 40(2): 45-50.
- Berni, J; Zarco-Tejada, P; Suarez, L; Fereres, E. 2009 Thermal and narrowband multispectral remote sensing for vegetation monitoring from an unmanned aerial vehicle. *Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 47(3):722-738.
- Bongiovanni, R; Chartuni, E; Best, S; Roel, A. 2006. *Agricultura de Precisión; Integrando conocimientos para una agricultura moderna y sustentable*. PROCISUR/IICA, Montevideo, Uruguay. 244 p.
- CANAPEP. 2015a. *La industria de la piña: motor económico y social de Costa Rica* (en línea). San José, Costa Rica. Consultado 3 de oct. 2018. Disponible en: <https://canapep.com/pina-economico-social-costa-rica/>
- CANAPEP. 2015b. ¿Por qué la producción de piña en Costa Rica es un sector esencial para la economía? (en línea). San José, Costa Rica. Consultado 3 de oct. 2018. Disponible en: <https://canapep.com/produccion-pina-costa-rica-sector-economia/>
- CANAPEP. 2018. *CANAPEP Estadísticas* (en línea). San José, Costa Rica. Consultado 3 oct. 2018) Disponible en: <https://canapep.com/estadisticas/>
- Ehsani, R; Maja, J. M. The Rise of Small UAVs in Precision Agriculture. *Resource Magazine*, 20(4): 18-19.

FAOSTAT. 2016. Base de datos estadística de la FAO. En línea. Disponible en:  
<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>

Fassinou, V; Lommen, W; Agbossou, E; Struik, P. 2015. Trade-offs of Flowering and Maturity Synchronization for Pineapple Quality. PLOS ONE 10(11), e0143290.  
<http://doi.org/10.1371/journal.pone.0143290>

Harwin, S; Lucieer, A. 2018. Assessing the Accuracy of Georeferenced Point Clouds Produced via Multi-View Stereopsis from Unmanned Aerial Vehicles (UAV) Imagery. Remote Sensing 4(6): 1573-1599.

Heady, H. 1957. The Measurement and value of plant height in the study of herbaceous vegetation. Ecology 38(2): 313-320.

Hill, J. 2018. Drone spraying and spreading becoming reality. Future Farming. En línea. Disponible en: <https://www.futurefarming.com/Tools-data/Articles/2018/9/Drone-spraying-and-spreading-becoming-reality-335322E/>

Historia | CANAPEP. 2019. (en línea, sitio web). Consultado 4 oct. 2019. Disponible en <https://canapep.com/historia/>.

Huang, H; He, S; Chen, C. 2019. Leaf Abundance Affects Tree Height Estimation Derived from UAV Images. Forests 10(10): 931

INFOCOMM. 2000. Conferencia de las naciones unidas sobre comercio y desarrollo: Piña. Ginebra, Suiza. 24 p.

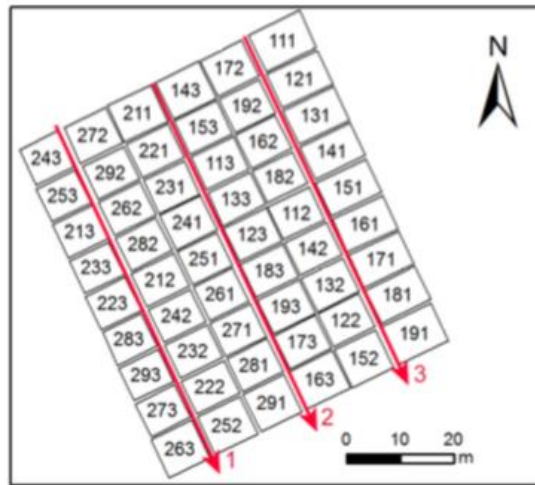
- Kyu-Jong, L; Byun-Jong, L. 2011. Estimating canopy cover from digital camera images of Rice Field. *Journal of Crop Science and Biotechnology* 14(2): 151-155.
- Lemaire, G; Gastal, F. 2002. N uptake and distribution in crops: an agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany* 53(370): 789-799.
- Liang, S; Li, X; Wang, J. 2012. *Advance Remote Sensing*. California, Estados Unidos, Elsevier. 800 p.
- Lobo, M. G; Paull, R. E. 2017. *Handbook of Pineapple Technology: Production, PostHarvest Science, Processing and Nutrition*. Chichester, Inglaterra, John Wiley and Sons. 272 p.
- Lumme, J; Karjalainen, M; Kaartinen, H; Kukko, A; Hyyppä, J. Hyyppä, H; Jaakkola, A; Kleemola, J. 2008. Terrestrial laser scanning of agricultural crops. *The International Archives of the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37: 563-566.
- Maglianesi, MA. 2013. Desarrollo de las piñeras en Costa Rica y sus impactos sobre ecosistemas naturales y agro-urbanos. *Biocenosis* 27(1-2).
- Mazur, M. 2016. Six Ways Drones Are Revolutionizing Agriculture. MIT Technology Research (en línea). Cambridge, Inglaterra. Consultado 3 oct. 2018. Disponible en: <https://www.technologyreview.com/s/601935/six-ways-drones-are-revolutionizing-agriculture/>
- Melgarejo, L. 2010. *Experimentos en fisiología vegetal*. 1ra edición. Medellín, Colombia, Universidad Nacional de Colombia. 277 p.



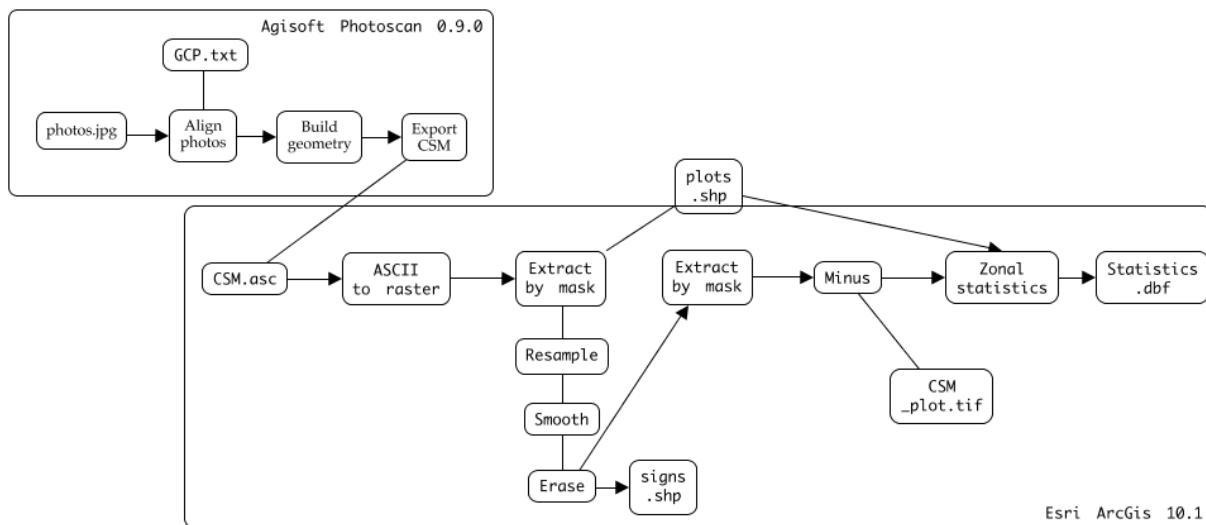
- Min, X. 1995. Physiological effects of environmental factors and growth regulators on floral Initiation and development of pineapple (*Ananas comosus* (L.) Merr). Tesis Ph.D. Michigan, Estados Unidos, University of Hawaii. 111 p.
- Mistele, B; Schmidhalter, U. 2008. Estimating the nitrogen nutrition index using spectral canopy reflectance measurements. *European Journal of Agronomy* 29(4): 184-190.
- Moeckel, T; Dayananda, S; Nidamanuri, R; Nautiyal, S; Hanumaiah, N; Buerkert, A; Wachendorf, M. 2018. Estimation of Vegetable Crop Parameter by Multi-temporal UAV-Borne Images. *Remote Sensing* 10(5): 805.
- Okamoto, K. 2001. *Global Environment Remote Sensing*. Ohmsha, Tokyo, Japón. 308 p.
- O`neal, Katzy. 2018. UCR investigates and provides solutions to controversial cultivation in Costa Rica (en línea). Consultado 3 de oct. 2018. Disponible en: <https://www.ucr.ac.cr/noticias/2018/06/21/ucr-investiga-y-aporta-soluciones-a-polemico-cultivo-en-costa-rica.html>
- Rodríguez, R; Becquer, R; Pino, Y; López, D; Rodríguez, RC; Lorente, GY; Izquierdo, RE; González, JL. 2016. Producción de frutos de piña (*Ananas comosus* (L.) Merr.) MD-2 a partir de vitroplantas. *Cultivos Tropicales* 37:40-48.
- Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A., Deering, D.W. 1973. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. In: *Proceedings of the Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium*, Goddard Space Flight Center, MD, 10–14 December, pp. 309-317, NASA SP-351 (Washington, DC: NASA Science and Technical Information Office).
- Steven, M. D; Clark, J. A. 2013. *Applications of remote sensing*. Cambridge University Press, Cambridge, Great Britain. 440 p.

- Sanewski, G.M. 2018. The History of Pineapple Improvement (en línea). In Ming, R (ed.). Cham, Springer International Publishing, vol.22. p. 87-96 DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-00614-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-030-00614-3_7).
- Taiz, L; Zeiger, E. 2010. Plant Physiology. 6<sup>th</sup> edition. Sunderland, Reino Unido. Sinauer Associates. 782 p.
- Tilly, N; Hoffmeister, D; Cao, Q; Huang, S; Lenz-Wiedemann, V; Miao, Y; Bareth, G. 2014. Multitemporal crop surface models: accurate plant height measurement and biomass estimation with terrestrial laser scanning in paddy rice. *Journal of Applied Remote Sensing*, 8(1). 23 p.
- U.S. Geological Survey. 1997. Standards for Digital Elevation Models, Part 1: General, Part 2: Specifications, Part 3: Quality Control. In: U.S.D.o.t. Interior (Ed.), U.S. Geological Survey, Washington, DC.
- West, P. 2006. Growing Plantation Forests. Berlin, Alemania, Springer Science and Business Media. 304 p.
- Xavier, A; Vettorazzi, C. Monitoring Leaf Area Index at watershed level through NDVI from Landsat-7/ETM+ data. *Scientia Agricola*, 61(3).
- Ziliani, M; Parkes, S; Hoteit, I; McCabe, M. 2018. Intra-Season Crop Height Variability at Commercial Farm Scales Using a Fixed-Wing UAV. *Remote Sensing* 10(12): 2007.
- Zhang, H; Sun, Y; Chang, L; Qin, Y; Chen, J; Qin, Y; Du, J; Yi, S; Wang, Y. 2018. Estimation of Grassland Canopy Height and Aboveground Biomass at the Quadrant Scale Using Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sensing* 10(6): 851.

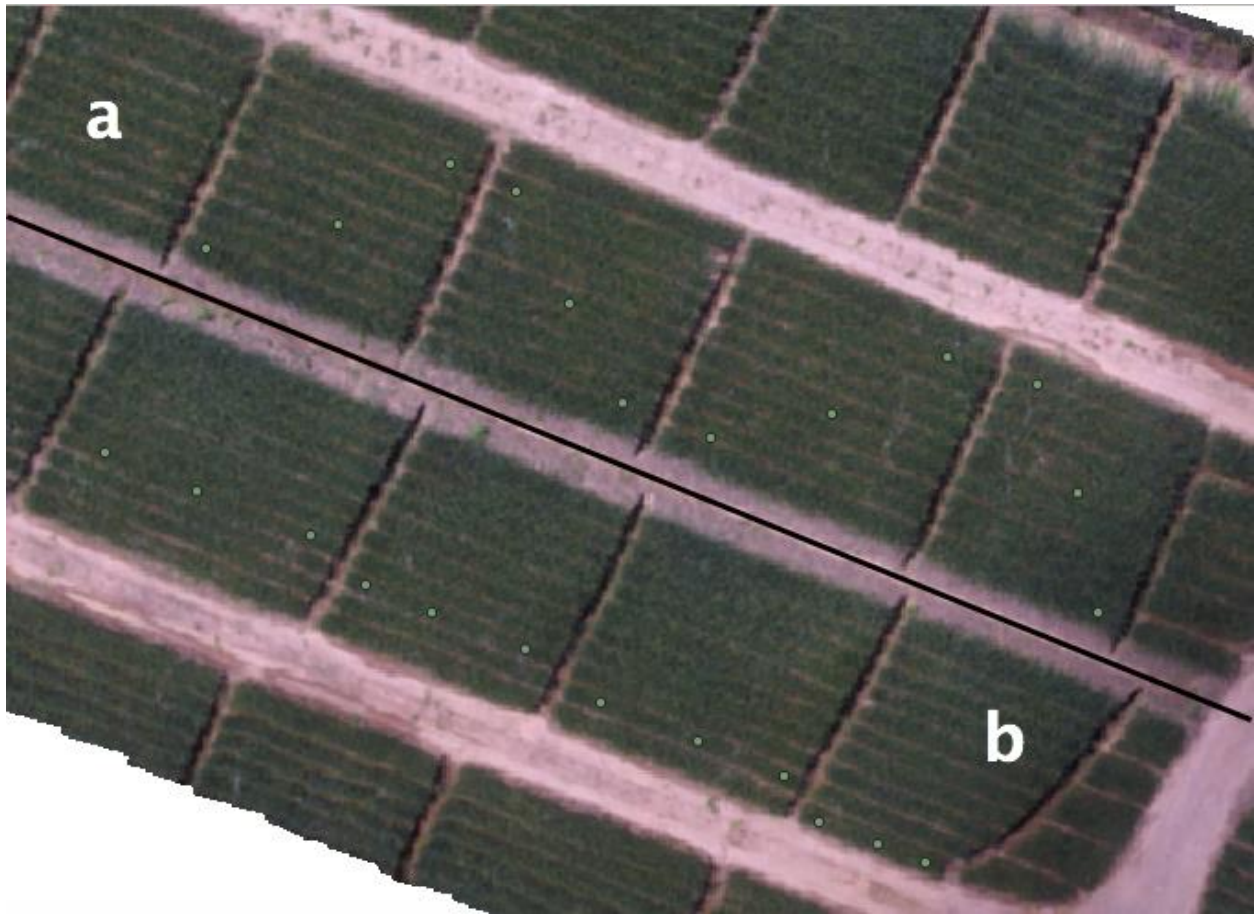
## Anexos



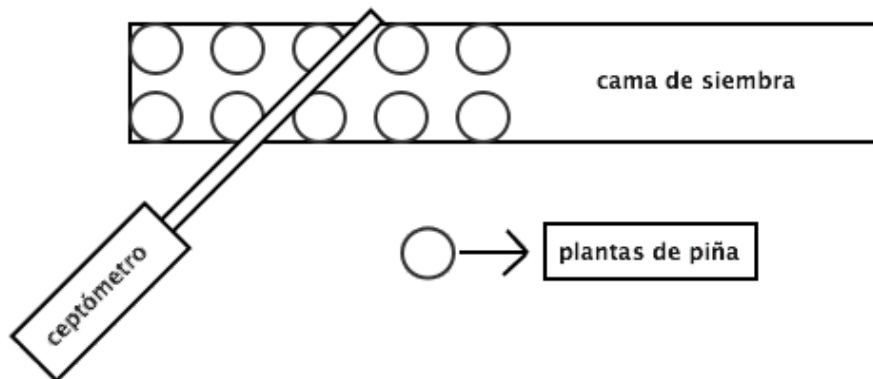
**Anexo 1.** Patrón de vuelo utilizado por Bendig *et al.*, 2014 para el cultivo de cebada.



**Anexo 2.** Diagrama de flujo de la metodología utilizada por Bendig *et al.*, 2014 para el procesamiento de los datos.



**Anexo 3.** Ejemplo del marcaje de los puntos de muestreo en el lote 36 (a) y en el lote 7 (b).



**Anexo 4.** Sugerencia del fabricante para la toma de datos con el ceptómetro. Adeptada del manual del LP-80 de Meter Group, INC. USA.



**CENTRO DE INVESTIGACIONES AGRONÓMICAS  
LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES  
REPORTE DE ENSAYO**

**N° DE REPORTE:** 72293

**USUARIO:** PROY. SENSORES REMOTOS - 3075-01 (CARLOS HENRIQUEZ)

**RESPONSABLE:** RICARDO HINE  
**CORREO:** carlos.henriquez@ucr.ac.cr  
**TELÉFONO:** 2511-2052

**PROVINCIA:** LIMON  
**CANTÓN:** GUACIMO  
**LOCALIDAD:** VILLA REAL  
**CULTIVO:** PIÑA

**ANÁLISIS:** TEXT  
**FECHA RECEPCIÓN:** 18/09/2019  
**EMISIÓN DE REPORTE:** 26/09/2019  
**N° DE MUESTRAS TOTAL:** 2  
**PÁGINA:** 1/1

**ANÁLISIS DE TEXTURA EN SUELOS**

ID USUARIO	ID LAB	%			Clase
		ARENA	LIMO	ARCILLA	Textural
LOTE 7 - 9 MESES	RN-19-01326	42	31	27	FRANCO
LOTE 36 - 4 MESES	RN-19-01327	60	18	22	FRANCO ARCILLO ARENOSO

**Ing. Agr. Rafael Mata Chinchilla M.Sc.  
COORDINADOR DEL LABORATORIO DE RECURSOS NATURALES**

1. Resultados expresados como porcentajes. 2. Procedimiento de textura de acuerdo al CIA-SC09-03-P02. Determinación de Textura en Suelos por el Método del Hidrómetro de Bouyoucos. 3. El muestreo es responsabilidad del usuario. 4. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 5. El tiempo de custodia es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 6. El Reporte de Ensayo válido es el original, firmado y sellado, cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

**Anexo 5.** Análisis de textura en suelos de los lotes 7 y 36 realizado en el laboratorio de Recursos Naturales del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.



CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN  
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES

REPORTE DE ENSAYO

RE-R01 (V2)

N° DE REPORTE:	72292		
USUARIO:	PROY. SENSORES REMOTOS - 3075-01 (CARLOS HENRIQUEZ)		
RESPONSABLE:	RICARDO HINE		
CORREO:	carlos.henriquez@ucr.ac.cr		
TELÉFONO:	2511-2052		
PROVINCIA:	LIMON	ANÁLISIS:	QC, CN
CANTÓN:	GUACIMO	FECHA RECEPCIÓN:	18/09/2019
LOCALIDAD:	VILLA FRANCA	EMISIÓN DE REPORTE:	26/09/2019
CULTIVO:	PIÑA	N° DE MUESTRAS TOTAL:	2
		PÁGINA:	2/2

ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS

	ID LAB	mS/cm		%		Relación C/N
		CE		C	N	
ID USUARIO		1,5				
LOTE 7 - 9 MESES	S-19-04895	0.1		1.06	0.15	7.1
LOTE 36 - 4 MESES	S-19-04896	0.3		1.19	0.14	8.5

ÚLTIMA LINEA

OBSERVACIÓN: El % C y N totales se determinaron con el Autoanálizador de C/N por combustión seca. Los valores de % C total correlacionan muy bien (R2=0.95) con el % de MO. Si quiere estimar el valor del % MO a partir del dato de % C total determinado con esta metodología, multiplique el % C total por 1.43.

B.Q. Mariana Blanco M.  
N.I. 2468  
Gestoría de Calidad

Ing. Agr. Michael González A.  
N.I. 7827  
Gestoría Técnica

1. El muestreo es responsabilidad del usuario. 2. Los resultados se refieren únicamente a las muestras ensayadas. 3. El tiempo de custodia de las muestras es de 45 días a partir del ingreso de la muestra. 4. El Reporte de Ensayo válido es el original firmado y sellado que se imprime a solicitud expresa del usuario; cuando el usuario solicita el envío del reporte por correo electrónico o fax libera al Laboratorio de resguardar la integridad y confidencialidad de sus resultados.

**Anexo 6.** Análisis químico de suelos de los lotes 7 y 36 realizado en el laboratorio de Suelos y Foliars del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.



CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN  
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES

**REPORTE DE ENSAYO**

RE-R01 (V2)

N° DE REPORTE: **72292**

USUARIO: PROY. SENSORES REMOTOS - 3075-01 (CARLOS HENRIQUEZ)

RESPONSABLE: RICARDO HINE

CORREO: carlos.henriquez@ucr.ac.cr

TELÉFONO: 2511-2052

PROVINCIA: LIMON

CANTÓN: GUACIMO

LOCALIDAD: VILLA FRANCA

CULTIVO: PIÑA

ANÁLISIS:

QC,CN

FECHA RECEPCIÓN: 18/09/2019

EMISIÓN DE REPORTE: 26/09/2019

N° DE MUESTRAS TOTAL: 2

PÁGINA:

1/2

**ANÁLISIS QUÍMICO DE SUELOS**

Solución Extractora:		pH	cmol(+)L					%	mg/L				
<b>KCI-Olsen Modificado</b>		H <sub>2</sub> O	ACIDEZ	Ca	Mg	K	CICE	SA	P	Zn	Cu	Fe	Mn
ID USUARIO	ID LAB	5.5	0.5	4	1	0,2	5		10	3	1	10	5
LOTE 7 - 9 MESES	S-19-04895	5.2	0.97	10.16	3.04	0.54	14.71	7	29	4.7	10	339	23
LOTE 36 - 4 MESES	S-19-04896	4.9	0.63	9.47	3.76	0.90	14.76	4	23	4.3	9	327	31

—ÚLTIMA LÍNEA—

Los valores debajo de cada elemento corresponden con los Niveles Críticos generales para la solución extractora usada

CICE=Capacidad de Intercambio de Cationes Efectiva=Acidez+Ca+Mg+K

SA=Porcentaje de Saturación de Acidez=(Acidez/CICE)\*100

**Anexo 7.** Análisis químico de suelo de los lotes 7 y 36 realizado en el laboratorio de Suelos y Foliars del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.



UNIVERSIDAD DE  
COSTA RICA

CIA Centro de  
Investigaciones  
Agronómicas

CIUDAD DE LA INVESTIGACIÓN  
LABORATORIO DE SUELOS Y FOLIARES

**REPORTE DE ENSAYO**

RE-R01 (V2)



N° DE REPORTE:	<b>72291</b>
USUARIO:	PROY. SENSORES REMOTOS - 3075-01 (CARLOS HENRIQUEZ)
RESPONSABLE:	RICARDO HINE
CORREO:	carlos.henriquez@ucr.ac.cr
TELÉFONO:	2511-2052
PROVINCIA:	LIMON
CANTÓN:	GUACIMO
LOCALIDAD:	VILLA FRANCA
CULTIVO:	PIÑA
ANÁLISIS:	QC,B,S
FECHA RECEPCIÓN:	18/09/2019
EMISIÓN DE REPORTE:	26/09/2019
N° DE MUESTRAS TOTAL:	2
PÁGINA:	1/1

**ANÁLISIS QUÍMICO FOLIAR**

ID USUARIO	IDLAB	% masa						mg/kg				
		N	P	Ca	Mg	K	S	Fe	Cu	Zn	Mn	B
LOTE 7 - 9 MESES	P-19-04597	1.35	0.20	0.25	0.19	2.67	0.09	215	7	20	116	47
LOTE 36 - 4 MESES	P-19-04598	1.46	0.18	0.19	0.17	4.21	0.08	201	10	20	76	25

-----ULTIMA LINEA-----

**Anexo 8.** Análisis químico foliar de las plantas en los lotes 7 y 36 realizado en el laboratorio de Suelos y Foliar del Centro de Investigaciones Agronómicas de la Universidad de Costa Rica.

Evaluación	1 centímetro					
	Mín		Promedio		Máx	
	r	r2	r	r2	r	r2
1	0,0026	0,0000	-0,0999	0,0100	-0,1071	0,0115
2	0,0424	0,0018	0,0408	0,0017	0,0454	0,0021
3	0,0715	0,0051	0,0734	0,0054	0,0689	0,0048
4	0,0685	0,0047	0,0650	0,0042	0,0643	0,0041
5	0,2816	0,0793	0,2755	0,0759	0,2695	0,0726
6	0,0957	0,0092	0,0795	0,0063	0,0683	0,0047

**Anexo 9.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura por cada medida de posición con 1 centímetro de radio según la evaluación.



Evaluación	10 centímetros					
	Mín		Promedio		Máx	
	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>
1	-0,2276	0,0518	-0,0838	0,0070	0,1050	0,0110
2	-0,2658	0,0706	-0,0944	0,0089	0,0462	0,0021
3	0,0848	0,0072	0,0669	0,0045	0,0946	0,0090
4	0,0183	0,0003	0,0692	0,0048	0,0577	0,0033
5	0,1309	0,0171	0,2608	0,0680	0,2966	0,0880
6	0,0158	0,0002	0,1138	0,0130	0,1048	0,0110

**Anexo 10.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura por cada medida de posición con 10 centímetro de radio según la evaluación.

Evaluación	20 centímetros					
	Mín		Promedio		Máx	
	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>
1	-0,1148	0,0132	-0,0986	0,0097	0,0894	0,0080
2	0,0477	0,0023	-0,0784	0,0061	0,0025	0,0000
3	0,0485	0,0024	0,0490	0,0024	0,0739	0,0055
4	0,0745	0,0055	0,0663	0,0044	0,0732	0,0054
5	0,1527	0,0233	0,2348	0,0551	0,2127	0,0452
6	-0,0469	0,0022	0,0813	0,0066	0,0788	0,0062

**Anexo 11.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura por cada medida de posición con 20 centímetro de radio según la evaluación.

Evaluación	1 centímetro					
	Mín		Promedio		Máx	
	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>
1	-0,1223	0,0149	-0,1177	0,0139	-0,1196	0,0143
2	-0,0254	0,0006	-0,0232	0,0005	-0,0208	0,0004
3	0,0023	0,0000	0,0131	0,0002	0,0329	0,0011
4	-0,0333	0,0011	-0,0210	0,0004	-0,0095	0,0001
5	0,0224	0,0005	0,0211	0,0004	0,0131	0,0002
6	-0,0555	0,0031	-0,0492	0,0024	-0,0392	0,0015
7	-0,2459	0,0605	-0,2139	0,0457	-0,2490	0,0620
8	-0,1014	0,0103	-0,0894	0,0080	-0,0751	0,0056
9	0,0100	0,0001	0,0014	0,0000	-0,0070	0,0000
10	-0,0058	0,0000	-0,0040	0,0000	-0,0018	0,0000
11	0,1596	0,0255	0,1599	0,0256	0,1646	0,0271

**Anexo 12.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura por cada medida de posición con 1 centímetro de radio según la evaluación.

Evaluación	10 centímetros					
	Mín		Promedio		Máx	
	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>
1	-0,2554	0,0652	-0,1187	0,0141	-0,0978	0,0096
2	-0,2137	0,0456	-0,0691	0,0048	-0,0278	0,0008
3	0,0382	0,0015	0,0163	0,0003	0,0853	0,0073
4	0,0212	0,0004	0,0180	0,0003	0,0884	0,0078
5	0,0637	0,0041	0,0228	0,0005	0,0181	0,0003
6	-0,0507	0,0026	-0,0540	0,0029	-0,0371	0,0014
7	-0,3024	0,0915	-0,2525	0,0637	-0,2398	0,0575
8	-0,0668	0,0045	-0,0744	0,0055	-0,0627	0,0039
9	0,0699	0,0049	0,0272	0,0007	0,0403	0,0016
10	-0,0104	0,0001	-0,0028	0,0000	0,0090	0,0001
11	0,1475	0,0218	0,1511	0,0228	0,1448	0,0210

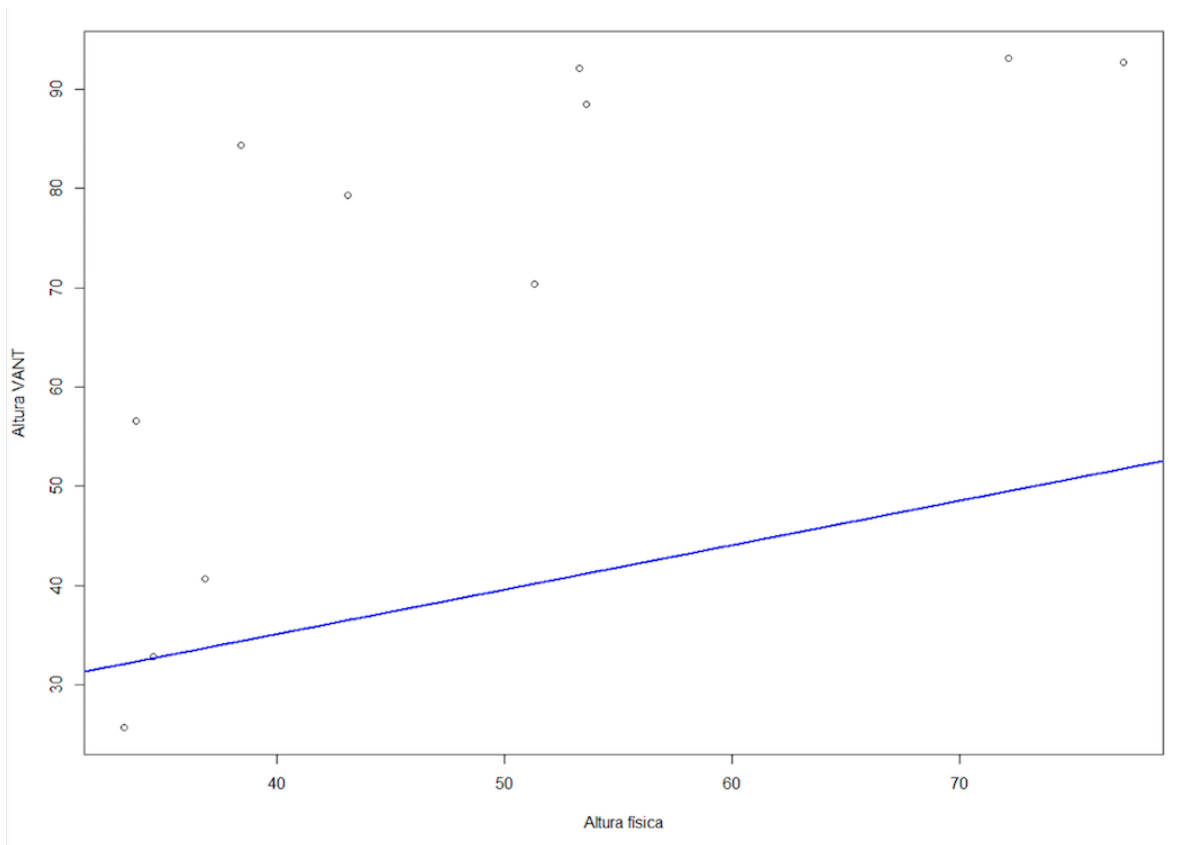
**Anexo 13.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura por cada medida de posición con 10 centímetro de radio según la evaluación.

Evaluación	20 centímetros					
	Mín		Promedio		Máx	
	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>	r	r <sup>2</sup>
1	-0,1533	0,0235	-0,2047	0,0419	-0,0719	0,0052
2	-0,0491	0,0024	-0,1185	0,0140	-0,0451	0,0020
3	-0,0143	0,0002	0,0133	0,0002	0,0639	0,0041
4	0,0653	0,0043	0,0027	0,0000	0,0797	0,0064
5	0,1030	0,0106	0,0115	0,0001	0,0356	0,0013
6	-0,0882	0,0078	-0,0551	0,0030	-0,0871	0,0076
7	-0,1949	0,0380	-0,2405	0,0579	-0,2258	0,0510
8	-0,1387	0,0192	-0,0601	0,0036	-0,0821	0,0067
9	0,0638	0,0041	0,0734	0,0054	0,0880	0,0077
10	-0,0151	0,0002	-0,0008	0,0000	0,0141	0,0002
11	0,1312	0,0172	0,1425	0,0203	0,1367	0,0187

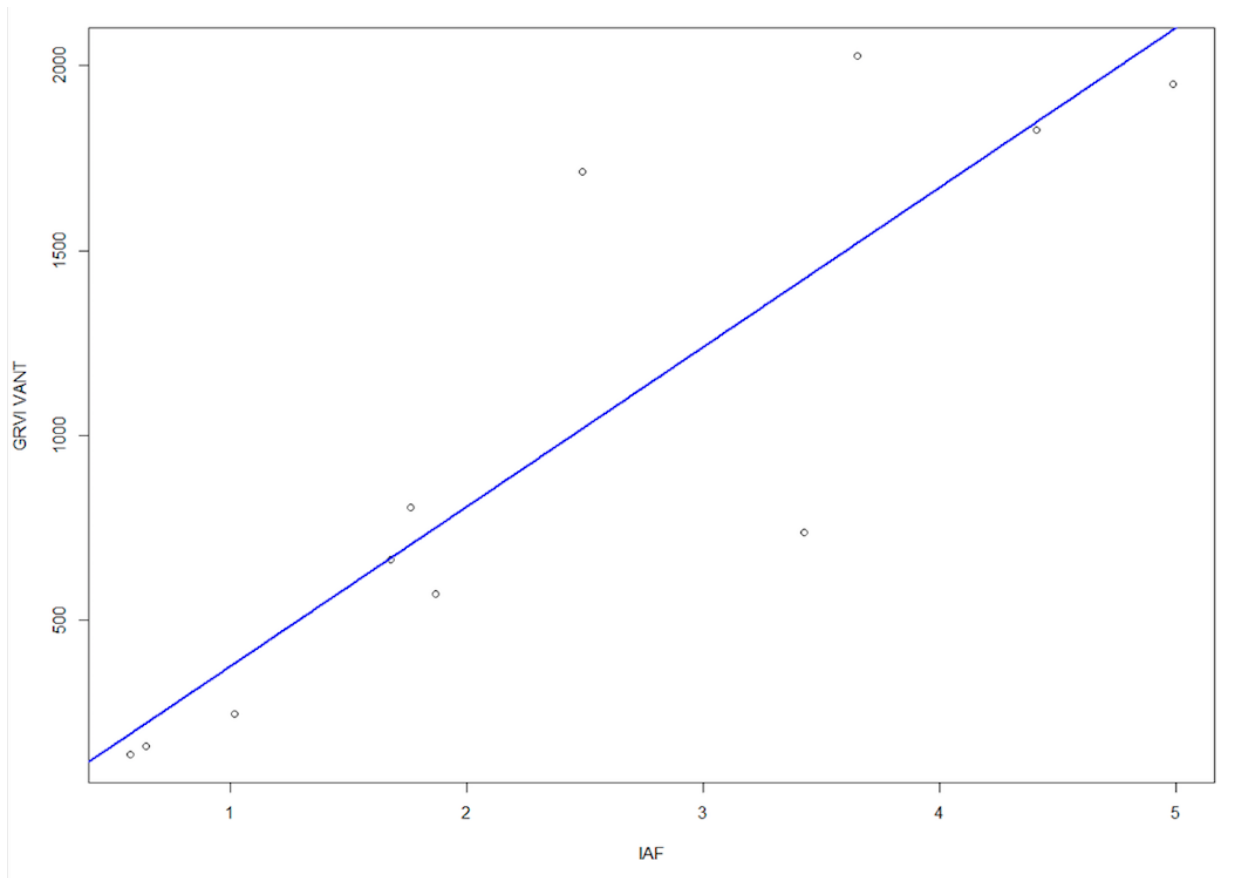
**Anexo 14.** Medidas de asociación y coeficiente de determinación de la variable altura por cada medida de posición con 20 centímetro de radio según la evaluación.

Criterio	Valor p
<u>Variables</u>	
GRVI	0,0002
Dummy	0,0081
<u>Supuestos</u>	
Normalidad	0,3971
Homoscedasticidad	0,0317
<u>Predicción</u>	
Coef de determinación	0,8343

**Anexo 15.** Criterios de información del modelo sobre el índice de área foliar original.



**Anexo 16.** Diagrama de dispersión de los datos de altura estimada con el VANT (altura VANT) y los datos obtenidos en campo (altura física).



**Anexo 17.** Diagrama de dispersión de los datos de GRVI estimados con el VANT (GRVI VANT) y los datos obtenidos en campo (IAF).