

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA

ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL

**EFICACIA DE LA FERTILIZACIÓN FOLIAR MEDIANTE AERONAVES
PILOTEADAS A DISTANCIA EN UN SISTEMA AGROFORESTAL CON
Musa textilis (Née)**

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON ÉNFASIS
EN MANEJO Y PRODUCCIÓN FORESTAL POR EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIATURA**

ANGIE DE LOS ÁNGELES ROJAS MARTÍNEZ

CARTAGO, COSTA RICA, 2023

**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE COSTA RICA
ESCUELA DE INGENIERÍA FORESTAL**

**EFICACIA DE LA FERTILIZACIÓN FOLIAR MEDIANTE AERONAVES
PILOTEADAS A DISTANCIA EN UN SISTEMA AGROFORESTAL CON
*Musa textilis (Née)***

**TESIS PARA OPTAR POR EL TÍTULO DE INGENIERA FORESTAL CON ÉNFASIS
EN MANEJO Y PRODUCCIÓN FORESTAL POR EL GRADO ACADÉMICO DE
LICENCIATURA**

ANGIE DE LOS ÁNGELES ROJAS MARTÍNEZ

CARTAGO, COSTA RICA, 2023

Eficacia de la fertilización foliar mediante el uso de aeronaves piloteadas a distancia en un sistema agroforestal con *Musa textilis* (Née).

Efficacy of foliar fertilization through the use of Remotely Pilot Aircraft System in an agroforestry system with *Musa textilis* (Née)

Resumen

El uso de aeronaves piloteadas a distancia para la fertilización foliar en la familia Musaceae son una tecnología emergente que permite una aplicación más eficiente y precisa de los nutrientes. *Musa textilis*, mejor conocida como abacá, es cultivada en Costa Rica con el fin de producir fibra comercial para su exportación. La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la eficacia de la fertilización foliar mediante el uso de aeronaves piloteadas a distancia en un sistema agroforestal con *M. textilis*, en la provincia de Limón. Para recopilar la información se comparó el uso de la tecnología con el método tradicional de bomba-espalda. Se realizó un estudio de tiempos y movimientos, se evaluó el área de cobertura colocando tarjetas hidrosensibles en tres estratos de la planta, y se compararon los costos de ambos métodos. Se obtuvo un tiempo de fertilización de 9 minutos con RPAS, un área de cobertura de 13,57 % por centímetro cuadrado y costo de alquiler del servicio y productos de fertilización de ₡24.994 por hectárea. Se concluyó que el uso de RPAS es más eficiente en tiempo, área cubierta, y ahorro de recursos que el método tradicional.

Palabras claves: Fumigación, aplicación aérea, *Musa textilis*, porcentaje de cobertura.

Abstract

The use of remotely piloted aircraft for foliar fertilization in the Musaceae family is an emerging technology that allows more efficient and accurate application of nutrients. *Musa textilis*, better known as abaca, is cultivated in Costa Rica to produce commercial fiber for export. The present research aimed to evaluate the efficacy of foliar fertilization using remotely piloted aircraft in an agroforestry system with *M. textilis*, in the province of Limón. To collect the information, the use of the technology was compared with the traditional pump-back method. A time and movement study were carried out, the area of coverage was evaluated by placing water-sensitive cards in three strata of the plant, and the costs of both methods were compared. A fertilization time of 9 minutes with RPAS, a coverage area of 13.57 % per square centimeter, and rental cost of the service and fertilization products of ₡24,994 per hectare were obtained. It was concluded that the use of RPAS is more efficient in time, area covered, and resource savings than the traditional method.

Keywords: Fumigation, aerial application, *Musa textilis*, percentage coverage.

Eficacia de la fertilización foliar mediante el uso de aeronaves pilotadas a distancia en un sistema agroforestal con *Musa textilis* (Née) © 2023 by Angie Rojas Martínez is licensed under Attribution-NonCommercial 4.0 International (CC BY-NC-ND 4.0).

Acreditación

CONSTANCIA DE DEFENSA PÚBLICA DE PROYECTO DE GRADUACIÓN

Trabajo final de graduación defendido públicamente ante el Tribunal Evaluador integrado por el Ing Mario Guevara Bonilla, M.Sc., Ing Dorian Carvajal Venegas, M.Sc y el Ing Dagoberto Arias Aguilar, Ph.D., como requisito parcial para optar por el grado de Licenciatura en Ingeniería Forestal, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Ing. Mario Guevara Bonilla, M.Sc

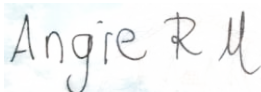
Profesor tutor

Ing. Dagoberto Arias Aguilar, Ph.D

Profesor lector

Dorian Carvajal Venegas, M.Sc

Profesor lector



Angie Rojas Martínez

Estudiante

Dedicatoria

Primeramente, a Dios, y a mi ángel en el cielo, mi papá Franklin, por darme la vida y fuerza para lograr materializar uno de mis sueños, ser ingeniera del TEC.

A mi mamá Rosa, y tía Caro, por ser mis guías, por apoyarme incondicionalmente y confiar en mí todos estos años de esfuerzo.

Índice general

Resumen.....	i
Abstract.....	ii
Acreditación	iii
Dedicatoria	iv
Introducción.....	1
Materiales y métodos	3
Sitio de estudio.....	3
Descripción del sistema agroforestal	4
Equipo de aplicación del fertilizante	5
Patrón de vuelo	6
Estudio de tiempos y movimientos.....	7
Muestreo del área de cobertura con bomba y RPAS	7
Diseño experimental	12
Costo de las aplicaciones	12
Resultados y discusión	13
Rendimiento con bomba-espalda.....	17
Cobertura con RPAS y bomba-espalda.	18
Tamaño de gotas en micrones.....	22
Cobertura con bomba	23
Costos de fertilización con bomba por hectárea	25
Conclusiones.....	30
Agradecimientos	32
Referencias	33
Anexos	36

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Área de los lotes de muestreo en un sistema agroforestal con <i>Musa textilis</i>	5
Cuadro 2. Ejemplo de los parámetros para calcular el número de gotas en las tarjetas hidrosensibles con RPAS.....	10
Cuadro 3. Parámetros para calcular el número de gotas en las tarjetas hidrosensibles con bomba-espalda.....	11
Cuadro 4. Porcentajes de eficiencia de la fertilización con RPAS en lotes de <i>Musa textilis</i>	13
Cuadro 5. Porcentajes de eficiencia de la fertilización con bomba.....	14
Cuadro 6. Comparación de la eficiencia y rendimiento por hectárea en la aplicación con bomba y RPAS.....	15
Cuadro 7. Número de gotas por estrato y centímetro cuadrado con RPAS.	18
Cuadro 8. Número de gotas por estrato y por centímetro cuadrado con bomba de espalda.	19
Cuadro 9. Clasificación del tamaño de gotas y su relación con la deriva.	22
Cuadro 10. Combinación de medias pareadas para resultados con bomba y RPAS.	24
Cuadro 11. Precio e insumos para fertilizar una hectárea con bomba-espalda	25
Cuadro 12. Costo promedio por hectárea del alquiler de RPAS para fertilización.	26

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación del sitio de estudio en finca La Lola, Batán, Limón.....	3
Figura 2. Sitio de estudio con una plantación de M. textilis.....	4
Figura 3. Modelo Agras T10 en plantación de abacá. Fuente: DJI agriculture.....	6
Figura 4. Trayectoria del vuelo con Agras T10.....	6
Figura 5. Estratos para determinar el área de cobertura con RPAS y bomba.....	8
Figura 6. Tarjetas hidrosensibles colocadas en la planta 50 en el estrato alto con RPAS y bomba, respectivamente.	9
Figura 7. Conteo de gotas con el programa Spyder en la aplicación con RPAS.....	10
Figura 8. Conteo de gotas con el programa Spyder en la aplicación con bomba.....	11

Introducción

La Industria 4.0 o cuarta revolución industrial es un concepto originado en Alemania durante la feria industrial más grande del mundo, Hannover Messe, en el 2011, la cual se basa en la convergencia de tecnologías avanzadas, como la automatización, el Internet de las cosas, la nanotecnología, la inteligencia artificial, y la analítica de datos. La aplicación de estas tecnologías ha permitido alcanzar niveles de eficiencia y productividad más altos en las operaciones, así como mayor sostenibilidad medioambiental [1].

Dentro de la industria 4.0 se encuentra inmersa la silvicultura de precisión que integra la tecnología digital a las prácticas silvícolas con el objetivo de recopilar información en tiempo real o de forma remota sobre los recursos forestales, y variables como la densidad del bosque, calidad del suelo, y sanidad de los cultivos mediante el cálculo de índices de vegetación [2].

Con la aplicación del concepto de agricultura de precisión, y con el desarrollo de la cuarta revolución industrial (Industria 4.0), se han introducido tecnologías que utilizan aeronaves pilotadas a distancia (RPAS). En la última década su utilización ha adquirido un creciente interés y se ha popularizado rápidamente, gracias a sus diferentes tamaños, formas y capacidades de operación, con un amplio espectro de aplicaciones civiles y de investigación [3]-[4], mostrando así el gran potencial de este tipo de tecnología para aplicaciones ambientales y de conservación [4].

Entre los principales beneficios del uso de RPAS se encuentran; la reducción del tiempo de muestreo y costos de la realización de inventarios forestales [5], se minimiza el error al tomar datos, favorece las prácticas de manejo, analiza la adaptación al cambio climático. Posee flexibilidad en el tiempo y espacio, se obtienen datos de gran precisión, y se disminuyen los riesgos humanos [3].

El uso de RPAS puede ser muy útil para la aplicación de fertilizantes o plaguicidas en áreas específicas de las plantas y no en toda la parcela, aumentando la precisión y la sostenibilidad en la aplicación [6].

En países asiáticos se reporta éxito en las aplicaciones de pulverizaciones con Agras T-10 para el control de plagas y enfermedades en *Musa x paradisiaca* [7] especie perteneciente a la familia de las musáceas. En Costa Rica empresas como Fumidrone e Indigo drones señalan rendimientos eficientes en la fertilización foliar con RPAS, indican que la aplicación es más precisa, se reduce la cantidad de agua por hectárea, se recortan jornales, representado beneficios económicos, ambientales y tecnológicos para el productor [8].

El presente estudio se enfocó en buscar alternativas para la aplicación de bioinsumos en el cultivo *Musa textilis* (abacá), en asocio dentro de un sistema agroforestal. El sitio se ubica en las llanuras del Caribe de Costa Rica y se caracteriza por una buena distribución de lluvias a lo largo del año y con la posibilidad de acceso a tecnología agrícola, de hecho, se localiza en los alrededores de las plantaciones de banano para exportación. Costa Rica se está posicionando como el tercer productor mundial de fibra de abacá después de Ecuador, y cuenta con aproximadamente 1500 hectáreas, cuyo producto es exportado a la Unión Europea, Japón e India [9]. El país presenta un alto potencial para alcanzar rendimientos superiores y de calidad de fibra en comparación con el resto de países productores.

A pesar de su creciente utilización aún existen vacíos de información sobre el cultivo, tendencias y áreas de oportunidad de aplicación en sistemas agroforestales [8].

Debido al avance tecnológico en el país, a la búsqueda de nuevas técnicas que aumenten la productividad en la silvicultura y el ahorro de recursos, surge el presente trabajo, el cual tiene como objetivo evaluar la eficacia de la fertilización foliar de bioinsumos mediante el uso de aeronaves pilotadas a distancia en un sistema agroforestal con *M. textilis*, así mismo, comparar el método tradicional bomba-espalda, el proyecto fue realizado en la provincia de Limón.

Materiales y métodos

Sitio de estudio

La investigación se realizó en la finca experimental La Lola, la cual pertenece al Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. La finca posee una extensión aproximada de 98 hectáreas y se encuentra ubicada en la provincia de Limón, cantón de Matina, caserío 28 Millas de Batán ($10^{\circ}06'$ latitud norte, $83^{\circ}23'$ longitud oeste). El sitio posee una altitud de 40 msnm, una temperatura anual promedio de 25° C, humedad relativa de 91 %, precipitación mensual promedio de 224 mm y radiación solar de 8 horas [10]. Según la clasificación de zonas de vida de Holdridge, el sitio corresponde con la zona de vida bosque tropical húmedo transición a muy húmedo [11].

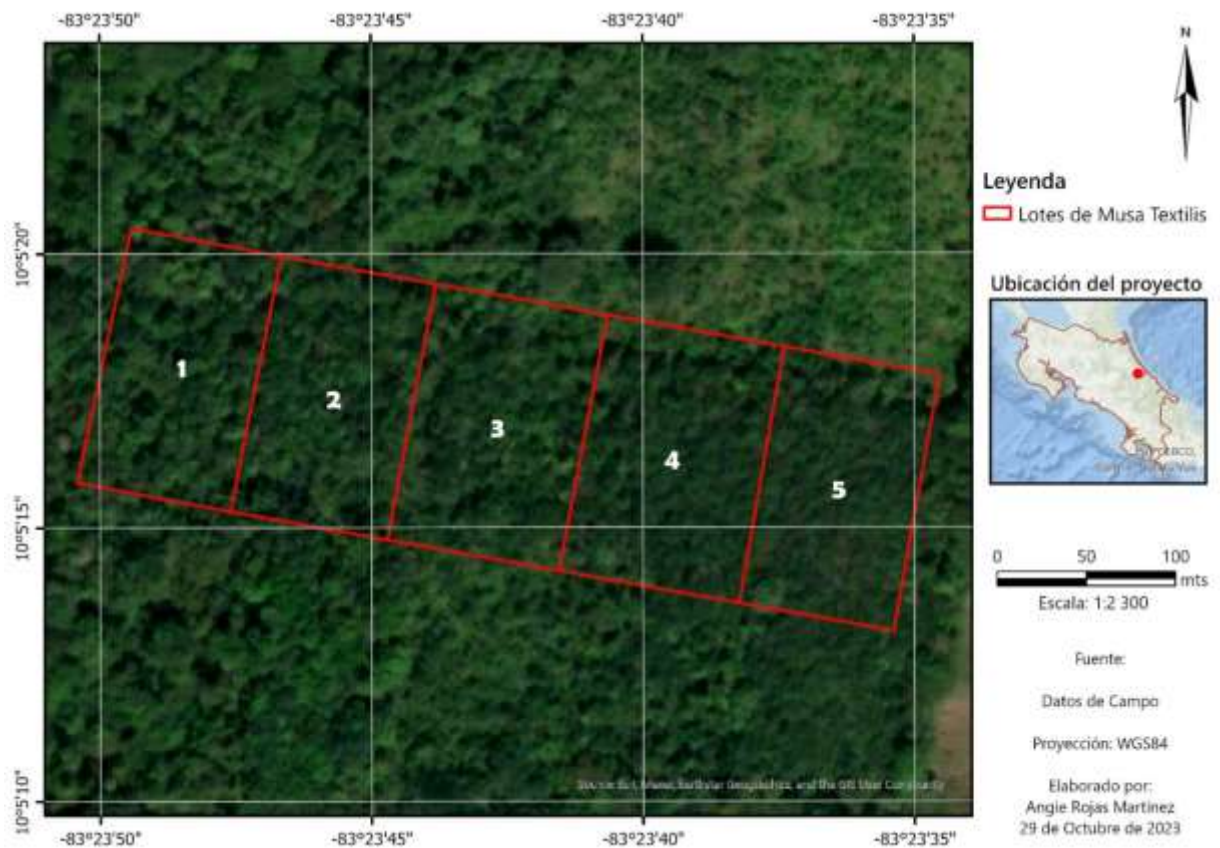


Figura 1. Ubicación del sitio de estudio en finca La Lola, 28 Millas de Batán, Limón.

Los suelos presentes son de orden inceptisol, están conformados principalmente por grava, rocas grandes, piedras, y una mezcla de arena que contiene pequeñas cantidades de material sedimentario producto de la erosión [11]. Existe una importante variación de la textura, el suelo tiene una baja capacidad de infiltración superficial y el drenaje es pobre [11].

El uso actual de la finca se divide en 29,36 hectáreas de *Theobroma cacao*, 2,11 ha de colecciones de cacao, 51,62 ha de plantaciones de *M. textilis*, 13,93 ha de uso forestal, y 0,56 ha de infraestructura.

Descripción del sistema agroforestal

El sistema agroforestal consiste en árboles asociados a cultivos, el componente agrícola es *M. textilis*, de 9 meses de edad, plantado a un distanciamiento de 3 x 3 metros, en un área de 8 hectáreas. El componente forestal lo conforman las especies *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Oken), *Vochysia guatemalensis* (Donn. Smith), *Ochroma pyramidale* (Cav. ex Lam.) Urb) y *Tectona grandis* L, cuya función es darle sombra al cultivo y diversificar el sistema para los beneficios ecosistémicos y el flujo de caja para el productor.



Figura 2. Sitio de estudio con una plantación de *M. textilis*.y *Cedrela odorata*

Para la fertilización con RPAS y el estudio de tiempos y movimientos, se muestrearon 4 lotes, los cuales se presentan en el siguiente cuadro con su respectiva área.

Cuadro 1. Área de los lotes de muestreo en un sistema agroforestal con *Musa textilis*.

Número de lote	Área (ha)
1	0,52
2	0,78
3	0,42
4	0,46

Para realizar la fertilización tradicional con bomba se muestrearon 4 lotes, en cada lote se cubrió área total de 810 m².

Para la aplicación de ambos métodos se utilizó agua, se tuvo una densidad de 1 g/ml, debido a que el objetivo del estudio fue estudiar el comportamiento del equipo y no el comportamiento de algún producto químico comercial en específico.

Equipo de aplicación del fertilizante

Se utilizó un RPAS marca DJI Agras T10 con 4 boquillas 110015, las cuales tienen un ángulo de aspersion de 110° y presión de 1,5 bares. El RPAS utilizado es de tipo multirotor, con un tanque de 8 litros, 4 boquillas de pulverización, un ancho de pulverización de 5 metros que permiten cubrir hasta 6 hectáreas por hora [12].

Se utilizaron dos baterías, las cuales se cargaron en las instalaciones del CATIE, el tiempo de vuelvo promedio del modelo es de 10 minutos.



Figura 3. Modelo Agras T10 en plantación de abacá. Fuente: *DJI agriculture*.

Patrón de vuelo

El plan de vuelo se estableció con el software DJI Agras App, incluido en el RPAS. Se configuró una altura de vuelo de 3,5, una velocidad promedio de 3,5 m/s, y un interlineado de 3 metros (figura 4).

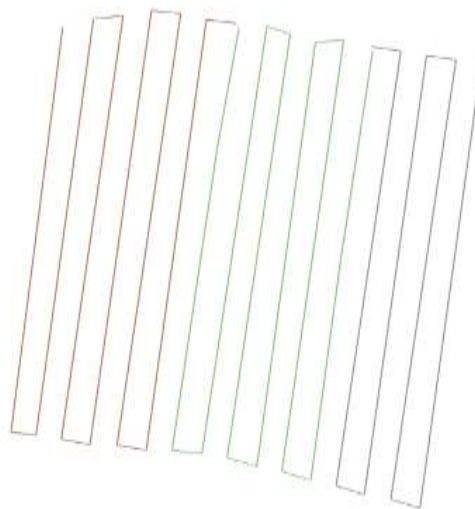


Figura 4. Trayectoria del vuelo con Agras T10.

Para la fertilización manual, se utilizó una bomba de espalda marca CARPI, la cual tiene una capacidad de almacenaje de 18 litros, con una boquilla de abanico antideriva 11002 con un ángulo de aspersión de 110° y una presión de 2 bares.

Antes de iniciar las labores de fertilización, tanto la bomba como el RPAS fueron previamente calibrados.

Estudio de tiempos y movimientos

Se realizó un estudio de tiempos y movimientos mediante el método del muestreo, con observaciones cada 1 minuto. Se registró la hora de inicio y fin de la actividad, así como los movimientos productivos e improductivos que se llevaban durante la labor.

Se consideraron movimientos productivos a aquellos en los que la bomba de espalda y el RPAS realmente estaban fertilizando el área, o los movimientos necesarios para su funcionamiento.

En movimientos improductivos se tomó en cuenta las interrupciones producidas de forma voluntaria o involuntaria; en el primer caso se incluye el periodo de descanso del operario y detenimiento de labores por conversar. En el caso de interrupciones involuntarias se contempló revisión y mantenimiento de la bomba, lluvia y fuertes vientos que impidieran la ejecución de labores, cambio de baterías del RPAS o pérdida de señal.

Para recopilar los datos en campo se crearon formularios para toma de datos de tiempos y movimientos con RPAS y bomba (Anexo 1).

Se digitó la información utilizando el software Microsoft Excel versión 2102 y para los dos métodos de aplicación se determinó el porcentaje de eficiencia para cada actividad.

Muestreo del área de cobertura con bomba y RPAS

Para determinar el área de cobertura que tuvo el método tradicional y el RPAS, se realizó un muestreo aleatorio, donde se seleccionaron 100 plantas, sobre las cuales se midieron 30 plantas de abacá en un área de 540 m². Cada planta fue marcada con cinta topográfica, se le midió su altura y se registró su sanidad. El promedio de altura de las plantas fue 108 centímetros.

Ambos métodos fueron aplicados en un día sin lluvia a una temperatura de 34 C°, humedad relativa de 87%.

En cada planta se colocaron 3 tarjetas hidrosensibles, una en el estrato alto, otra en el medio y la última en el estrato bajo de la copa (figura 5), las cuales fueron sostenidas por una grapa. Posteriormente, se realizaron las aplicaciones con ambos métodos, primero con el RPAS, y cuando las plantas estuvieran secas se repitió el proceso con la bomba de espalda.

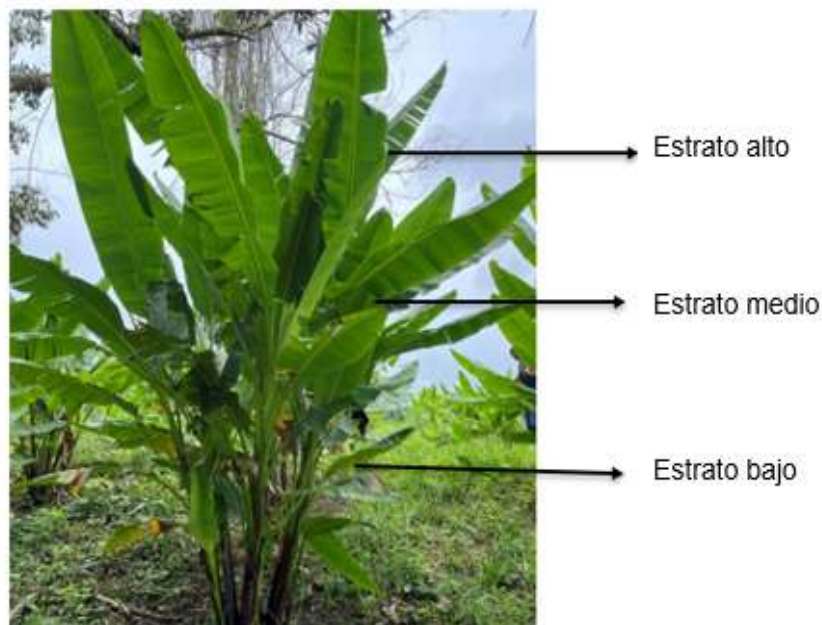


Figura 5. Estratos para determinar el área de cobertura con RPAS y bomba.

Cuando las tarjetas hidrosensibles se secaron, con un teléfono celular modelo iPhone 8, con una cámara de 12 megapíxeles, se tomaron 76 fotografías en el método con bomba y 76 fotos con RPAS.

Análisis de tarjetas hidrosensibles

Con el programa GIMP 2.10.12. se procesaron las 156 fotografías fueron recortadas seleccionando cada esquina, de tal forma que en el conteo de gotas fuera lo más preciso posible, y el programa no tomara gotas fuera de la tarjeta hidrosensible.

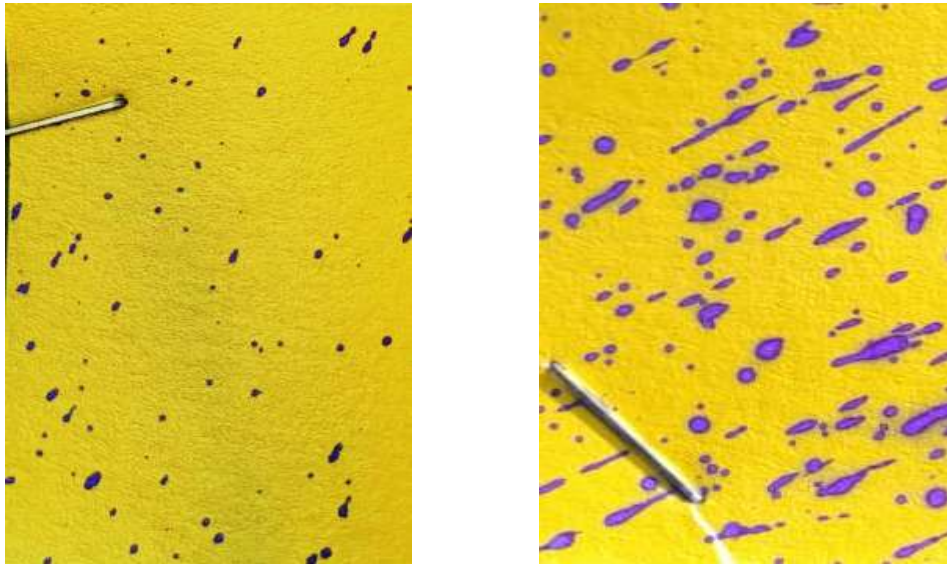


Figura 6. Tarjetas hidrosensibles colocadas en la planta número 14 en el estrato alto con RPAS y bomba, respectivamente.

Cantidad de gotas

Para calcular el número promedio de gotas, en el programa *Spyder* con la biblioteca *Opencv* con lenguaje de programación *Python* se probaron distintas combinaciones de parámetros de área mínima, circularidad, relación de inercia y convexidad, hasta encontrar la combinación más idónea para aumentar la precisión del conteo. El código que se utilizó fue de "detección de burbujas", ver anexo 2.

Inicialmente el programa convierte imágenes de origen en binarias, en cada imagen binaria, se agrupan los píxeles blancos conectados, y se calculan los centros y radios de las burbujas recién fusionadas.

El área mínima hace referencia a el número de burbujas que hay por pixel, la circularidad que tan circular es la gota, la convexidad se refiere a el área de la gota entre el área de su casco convexo, la relación de inercia indica que tan alargada es una gota.

Se observa que, con los parámetros de la última fila del cuadro se obtuvo un mayor conteo en el número de gotas. Para el análisis de las 78 fotos atrás se tuvo que mencionar como se llegó a 78 fotos se utilizaron los mismos parámetros.

Cuadro 2. Ejemplo de los parámetros para calcular el número de gotas en las tarjetas hidrosensibles con RPAS.

Planta	Área mínima	Circularidad	Convexidad	Relación inercia	Nº gotas
5M	9	0.75	0.25	0.1	66
5M	9	0.50	0.25	0.075	93
5M	9	0.55	0.25	0.075	91
5M	9	0.40	0.50	0.025	96
5M	9	0.40	0.50	0.075	97
5M	7	0.40	0.50	0.055	113

Al correr el código se obtuvo el resultado de la figura 6, un promedio de 113 gotas en la tarjeta colocada en el estrato medio de la planta 5.



Figura 7. Conteo de gotas con el programa Spyder en la aplicación con RPAS.

Para calcular el número de gotas en las tarjetas con la bomba de espalda, se utilizaron diferentes parámetros de tamaño, forma y convexidad de las gotas, el área mínima se mantuvo en 7 píxeles. Con la última combinación se logró un mayor conteo en las gotas. Para el análisis de las 78 fotos se utilizaron los mismos parámetros.

Cuadro 3. Parámetros para calcular el número de gotas en las tarjetas hidrosensibles con bomba-espalda.

Planta	Área mínima	Circularidad	Convexidad	Relación inercia	N° gotas
5M	9	0.45	0.50	0.055	70
5M	9	0.45	0.50	0.090	70
5M	9	0.30	0.50	0.025	80
5M	9	0.35	0.50	0.010	80
5M	9	0.35	0.40	0.010	83
5M	7	0.35	0.40	0.010	97

Al correr el código con los parámetros anteriores, se obtiene un promedio de 97 gotas en la tarjeta colocada en el estrato medio de la planta 5.



Figura 8. Conteo de gotas con el programa Spyder en la aplicación con bomba.

Diseño experimental

Para probar las diferencia entre ambos métodos de aplicación de insumos foliares, se estableció una comparación de medias apareadas que consistió en 26 plantas, seleccionadas previamente y cada una de las plantas se les determinó el número de gotas por estrato y gotas por cm^2 . Al tratarse de las mismas plantas se utilizó una prueba de dos medias apareadas con tamaño $n=25$ y un nivel de significancia de $\alpha=0,05$.

A cada variable se le realizó la prueba de normalidad con Shapiro Wilks, con el *software Infostat*

Costo de las aplicaciones

Se realizó una comparación de costos entre la fertilización tradicional con bomba de espalda y el RPAS, para así determinar la variación entre ambos métodos. Para la técnica con equipo de aspersión manual, se tomó el precio del equipo, de la boquilla, la cantidad de agua, producto requerido, el mantenimiento del equipo, y el precio del jornal.

Para determinar el costo con RPAS, se consultó el precio por hectárea del servicio que brindan empresas nacionales como Indigo Drones, Fumidrone, y El Colono, también el precio de los fertilizantes que utilizan, y el coadyuvante para aumentar la densidad de las gotas.

Resultados y discusión

Tiempos y movimientos

Los estudios de tiempos y movimientos son de importancia en estudios técnicos y científicos ya que permiten averiguar gracias al análisis, la productividad, rendimientos, faltas y errores cometidos a consecuencia de un método o técnica de trabajo insuficiente y de una mala adaptación del ejecutante o del material a la tarea a realizar [13].

Se determinaron los tiempos y movimientos del RPAS en 4 lotes distintos de abacá (cuadro 5). Los lotes aplicados tenían un área promedio de 0,54 hectáreas. El promedio del porcentaje de eficiencia obtenido es superior al 85 % con un coeficiente de variación cercano al 20 %.

Cuadro 4. Porcentajes de eficiencia de la fertilización con RPAS en lotes de *Musa textilis*.

Lote	Movimientos productivos	% Eficiencia
1	5	83
2	7	63
3	8	100
4	4	100
Promedio E%	Desviación	CV%
86,74 %	17,29	19,3 %

Entre los principales atrasos registrados se encontraron los fuertes vientos y el cambio de baterías que hizo que la operación se detuviera por completo. El factor tiempo es una amenaza en la implementación de dicha tecnología para fertilizar, pero para la aplicación con bomba también, porque bajo fuertes lluvias el fertilizante no se adhiere a las hojas y se lava.

Para los cuatro lotes evaluados con la bomba de espalda, se obtuvo un porcentaje de eficiencia mayor al 70 % (Cuadro 6). Los principales atrasos encontrados fueron el mantenimiento de la bomba y el descanso del operario. A diferencia de la aplicación con el RPAS, el coeficiente de variación de esta operación fue muy baja.

Cuadro 5. Porcentajes de eficiencia de la fertilización con bomba.

Lote	Movimientos productivos	% Eficiencia
1	6	75
2	7	70
3	9	81
4	9	75
Promedio E%	Desviación	CV %
75,45 %	4,85	6,43 %

CV %: Coeficiente de variación

% E: eficiencia

El tiempo del ciclo fue aumentando conforme se pasaba al siguiente lote; las bombas tipo mochila pueden llevar a una mala calidad de aplicación, es difícil lograr aplicaciones precisas y consistentes sin reguladores.

Los porcentajes de eficiencia pueden variar debido a condiciones ambientales, topografía del sitio, la capacidad de carga en litros; cuanto mayor sea la capacidad de la bomba, más rápido se completará la fertilización, [14] la duración de la jornada o a la experiencia del operario [14] entre más experiencia tiene, la aplicación es más eficiente, pero, cuando el área por cubrir es mayor, el operador está sujeto a fatiga y la exigencia física aumenta.

El uso de bomba manual en personas entre 20-30 años causa molestias en la espalda y la columna, en años posteriores tendrán mayor agudeza en los padecimientos [14]. Para disminuir las molestias se recomienda adquirir una bomba de motor la cual presenta mejor diseño ergonómico, y la labor se puede realizar en menos tiempo, o que cada 30 minutos el operador tenga un descanso mínimo de 5 minutos.

Los factores anteriores y la poca capacitación del personal, y jornadas más largas producirán mayores movimientos improductivos, principalmente en el tiempo de descanso y alimentación.

Debido a la poca experiencia referente a porcentajes de eficiencia en labores de fumigación en sistemas agroforestales, no hay plena certeza si los valores encontrados son aceptables. En actividades forestales donde se requiere operarios con algún tipo de herramienta mecánica o manual, se ha sugerido que porcentajes de eficiencia entre 50 y 60 % pueden ser considerados aceptables [15] [16].

Productividad de la labor

Para tener una estimación de la productividad de la labor con ambos métodos de aplicación, se consultó a la empresa Indigo drones y al encargado de la fertilización en finca La Lola.

Cuadro 6. Comparación de la eficiencia y rendimiento por hectárea en la aplicación con bomba y RPAS.

Equipo	Litros de agua/ha	Dosis de fertilización (L)	Tiempo de fertilización/Ha (min)	Ha/jornal
RPAS	20	1	9	48
Bomba	200	1	180	2.6

En el presente estudio se vio reflejado que existen grandes diferencias entre la aplicación con RPAS y el método tradicional. Por la velocidad de aplicación y facilidad de aspersión, un Agras T-10 podría abarcar hasta 48 hectáreas por día, Indigo Drones [14] indica que es un rendimiento adecuado de acuerdo al modelo.

En Costa Rica la fertilización o aplicación de bioinsumos foliares de *M. textilis* utilizando RPAS es inexistente, las aplicaciones y estudios se concentran principalmente en otras especies de musáceas como *Musa paradisiaca* y *Musa cavendish*. Rojas-Jara [8] indica que la empresa nacional Fumidrone bajo condiciones climáticas ideales, calibración adecuada del equipo y boquillas de aspersión, autocabeceo en el plan de vuelo, el porcentaje de eficiencia de la aplicación en musáceas es del 90 %.

Actualmente, en el mercado hay otros modelos de RPAS más avanzados que alcanzan eficiencias operativas mayores, debido al incremento en el número de hélices y mayor capacidad de carga. [17] menciona en su trabajo que con un Agras T-16, con capacidad de 16 litros se puede lograr una cobertura de 10 hectáreas por hora y de 60 ha por día.

Con el modelo Agras T-40 y su carga de pulverización de 40 kg, distribuida en 70 L, es posible cubrir 21.3 hectáreas por hora y 90 ha por día [12] ,una de las principales ventajas es la reducción en la cantidad de agua por hectárea, con el método tradicional se usaban hasta 100 litros, actualmente con RPAS se usan 20 o 30 litros/ha, y el tratamiento se focaliza a la zona deseada, la deriva no afecta al cultivo del lado, o a la salud humana.

Los altos rendimientos con RPAS son respaldados por Arboleda y Massuh [17] donde indican que la precisión del pulverizador permite llegar al 100% del objetivo, y bajo condiciones puede dispersar el contenido en una plantación de dos hectáreas aproximadamente en seis minutos, debido a su diseño logra llegar con gran facilidad a las aéreas más inaccesibles.

El servicio de fumigación y fertilización en cultivos de banano a través de RPAS es mucho más eficiente que la manera tradicional, donde se utiliza recurso humano para esas labores [18]-[19] aseguran que la implementación en el sector agrícola permite a los productores tener mayor efectividad en cada área cosechada. [14] en el estudio de la universidad técnica de Quevedo se respalda que con RPAS es posible ahorrar hasta un 90% de agua en comparación con otros sistemas de fumigación.

Como limitantes en el uso de RPAS, se encuentra la fuerte dependencia a las condiciones climáticas, con lluvia y fuertes vientos su capacidad de operar eficientemente es limitada, otra limitación es que para ciertos modelos como Agras T-10 el tiempo de vuelo es muy corto.

Rendimiento con bomba-espalda.

Con los datos obtenidos en la Finca La Lola se observa que rendimiento en la fertilización con bomba es bajo comparado con la utilización de RPAS, por día solo se pueden fertilizar 2.6 hectáreas, se requieren muchos litros de agua, dado que la capacidad de la bomba es limitada y se requiere recargar con frecuencia, para cubrir grandes áreas no es el método más eficiente, por lo cual la precisión en la aplicación puede disminuir, y fertilizar en exceso o aplicar dosis más bajas que las requeridas por cada planta.

Cobertura con RPAS y bomba-espalda.

En los cuadros 7 y 8 se observa la cantidad promedio de gotas por tarjeta por centímetro cuadrado de las aplicaciones con RPAS y bomba de espalda.

Cuadro 7. Número de gotas por estrato y centímetro cuadrado con RPAS.

Planta	Número de gotas por estrato			Gotas/ cm ²		
	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo
1	110	113	54	11,13	11,44	5,47
2	254	94	50	25,71	9,51	5,06
3	231	150	57	23,38	15,18	5,77
4	200	164	100	20,24	16,60	10,12
5	119	189	38	12,04	19,13	3,85
6	198	176	80	20,04	17,81	8,10
7	56	140	84	5,67	14,17	8,50
8	18	74	50	1,82	7,49	5,06
9	72	102	32	7,29	10,32	3,24
10	123	120	170	12,45	12,15	17,21
11	198	170	346	20,04	17,21	35,02
12	130	195	200	13,16	19,74	20,24
13	112	193	140	11,34	19,53	14,17
14	180	165	307	18,22	16,70	31,07
15	102	100	112	10,32	10,12	11,34
16	80	96	52	8,10	9,72	5,26
17	90	110	105	9,11	11,13	10,63
18	150	160	100	15,18	16,19	10,12
19	70	130	200	7,09	13,16	20,24
20	130	150	300	13,16	15,18	30,36
21	117	150	203	11,84	15,18	20,55
22	158	134	51	15,99	13,56	5,16
23	104	87	17	10,53	8,81	1,72
24	125	100	90	12,65	10,12	9,11
25	145	102	86	14,68	10,32	8,70
26	89	70	60	9,01	7,09	6,07
Gotas promedio	134,08	132,08	118,62	13,57	13,37	12,01
Desviación	55,47	37,45	90,16	6,00	3,79	9,13
% CV	42,91	28,36	76,01	41,18	28,35	76,01

Cuadro 8. Número de gotas por estrato y por centímetro cuadrado con bomba de espalda.

Planta	Número de gotas por estrato			Gotas/cm ²		
	Alto	Medio	Bajo	Alto	Medio	Bajo
1	25	97	219	2,53	9,82	22,17
2	51	160	37	5,16	16,19	3,74
3	180	160	60	18,22	16,19	6,07
4	87	83	90	8,81	8,40	9,11
5	87	43	44	8,81	4,35	4,45
6	126	87	23	12,75	8,81	2,33
7	193	4	0	19,53	0,40	0,00
8	0	0	8	0,00	0,00	0,81
9	60	175	108	6,07	17,71	10,93
10	107	98	55	10,83	9,92	5,57
11	60	20	250	6,07	2,02	25,30
12	130	120	190	13,16	12,15	19,23
13	140	119	200	14,17	12,04	20,24
14	195	160	165	19,74	16,19	16,70
15	0	80	70	0,00	8,10	7,09
16	0	129	170	0,00	13,06	17,21
17	0	99	6	0,00	10,02	0,61
18	80	70	12	8,10	7,09	1,21
19	18	170	0	1,82	17,21	0,00
20	100	120	170	10,12	12,15	17,21
21	19	122	150	1,92	12,35	15,18
22	11	115	30	1,11	11,64	3,04
23	66	13	12	6,68	1,32	1,21
24	0	55	9	0,00	5,57	0,91
25	0	230	88	0,00	23,28	8,91
26	7	21	48	0,71	2,13	4,86
Gotas promedio	74,73	98,08	85,15	7,6	9,9	8,6
Desviación	78,50	59,10	78,00	7,95	5,98	7,89
% CV	105,05	60,26	91,60	105,05	60,26	91,60

El comportamiento esperado para el número de gotas en el estrato alto es que sea mayor que en los estratos medios y bajos [19] sin embargo, en el cuadro 7 se evidencia que, en algunas plantas evaluadas la cantidad de gotas en el estrato alto es menor a la cantidad de gotas contabilizadas en el estrato medio.

La uniformidad en la distribución de gotas en los diferentes estratos es un aspecto importante por considerar al configurar y calibrar la aplicación con RPAS. Para este estudio se encontró que la cantidad de gotas en los 3 estratos fue muy dispersa, obteniendo un coeficiente de variación superior al 20 %.

Arraiga-García [20] menciona que porcentajes de coeficiente de variación mayores al 20 % pueden considerarse altos debido a la necesidad de precisión en la distribución de fertilizantes. Esto coincide con lo encontrado por [21] donde indica que se debe lograr una distribución equitativa de las gotas en los estratos medios y bajos, donde se encuentran las partes más críticas de las plantas.

Para corregir esto se recomiendan ajustes en la configuración de la aeronave y de las boquillas, realizar la práctica de “autocabeceo” que es la forma automatizada en la cual el RPAS realiza una línea de vuelo en todo el contorno del plan de vuelo, de forma que se minimizan las áreas sin aplicar, así como un monitoreo cuidadoso durante la aplicación para asegurar que se cumplan los objetivos de fertilización.

En la fertilización foliar en *Musa x paradisiaca* lo ideal es que las gotas sean más grandes, con un tamaño aproximado de 300 micrones, esto para que la aplicación se sitúe en el estrato superior, pero con un rango de variación menor al 70 % respecto a la distribución en el estrato medio y bajo [8].

El número de gotas en el estrato medio es menos disperso, pero, en algunas plantas hay más gotas que en el estrato alto, esto porque hubo un traslape mayor del 30 % en las líneas de vuelo, se recomienda aumentar el ancho de la aplicación, o disminuir la altura de vuelo, y así reducir el porcentaje de traslape.

Una altitud demasiado alta puede resultar una aplicación ineficaz, mientras que una altitud de vuelo demasiado baja puede aumentar el riesgo de colisión con obstáculos.

Una velocidad de vuelo muy alta puede resultar en una aplicación desigual, mientras que una velocidad demasiado baja puede aumentar el tiempo de aplicación y el costo total desde un punto de vista operativo [12].

Se evidencia que en el estrato bajo hay tarjetas con valores atípicos de hasta 350 gotas, esto principalmente porque no se utilizó ningún tipo de coadyuvante, y las gotas que deberían quedar en el estrato alto y medio escurren al estrato bajo, generando alta heterogeneidad en la aplicación.

Las hojas de *M. textilis* tienen una capa cerosa en la superficie, es necesario utilizar mezclas lipofílicas, para garantizar que las fases lipofílicas e hidrofílicas se mezclen de manera uniforme [8], de esta forma la aplicación será más homogénea en los tres estratos, se evita que gran parte del producto escurra a estratos inferiores, y se logra optimizar al máximo la acción de los principios activos de los productos utilizados.

Otro factor que influyó en la heterogeneidad de la aplicación y la movilización de las gotas hacía el estrato medio y bajo, fueron las condiciones meteorológicas, [22] indica que es de suma importancia medir la temperatura, humedad, dirección del viento, antes, durante, y después de una aplicación en el campo. [23] reafirma que son factores muy decisivos para el éxito o el fracaso de una aplicación, ya que tienen una influencia positiva o negativa sobre la uniformidad de la aplicación (% CV) y la recuperación del producto (%).

La temperatura y humedad máxima para realizar fertilizaciones aéreas puede variar según la ubicación geográfica, las condiciones específicas del cultivo y del tipo de fertilizante utilizado. Sin embargo, no se recomienda pulverizaciones con temperaturas mayores a 35 °C, humedad relativa mayor a 85 % y velocidad de viento con ráfagas mayores a 2 m/s [24].







El factor ambiental pudo haber sido una limitante en el estudio, ya que al momento de la aplicación se registró una temperatura de 34°, y humedad relativa de 87 %, muchas gotas finas pudieron evaporarse. Altos valores de temperatura y bajos porcentajes de humedad relativa producen evaporaciones más rápidas, lo cual reduce el tamaño de

las gotas en vuelo, e incrementa el riesgo de deriva, con la velocidad del viento sucede igual, a mayor velocidad más evaporación de las gotas [25].

Tamaño de gotas en micrones

El tamaño de las gotas se clasifica según la norma S-572 de la ASABE (*American Society of Agricultural and Biological Engineers*) en 6 categorías.

Cuadro 9. Clasificación del tamaño de gotas y su relación con la deriva.

Clasificación	Tamaño (μm)	Color
Muy fina (VF)	Menor a 100	
Fina (F)	100 a 175	
Mediana (M)	175 a 250	
Grande (G)	250 a 375	
Muy grande (VC)	375 a 450	
Extremadamente grande (XC)	Mayor a 450	

La clasificación por colores de la norma S-572 de la ASABE hace referencia a que tan susceptibles son las gotas a la deriva. Las gotas de muy finas a finas generalmente presentan exoderiva, indica que las gotas son tan pequeñas que tienden a evaporarse o a translocarse por el viento. Las gotas extremadamente grandes se conocen como endoderiva, por su tamaño y peso, las gotas rebotan en las hojas y caen al suelo, o a un estrato no deseado [24].

La elección del tamaño de gotas en la fertilización con RPAS es un aspecto crítico que debe contemplar la eficiencia de absorción, la deriva, la compatibilidad con los cultivos y las condiciones climáticas. La comparación de resultados es esencial para determinar la configuración óptima de RPAS en una aplicación específica.

De acuerdo a los parámetros del cuadro 9 se recomienda que los diámetros volumétricos medios para las fumigaciones o fertilizaciones en cultivos arbóreos sea de gotas medianas a grandes (200-400 micrómetros) para que pueda alcanzar todas las partes del árbol, es importante conocer este parámetro para determinar el tipo agroquímico o agro insumo que se debe utilizar, o para medir si la aplicación fue eficaz en términos de cantidad, tamaño y amplitud relativa de gotas.

La FAO sugiere para fungicidas, herbicidas e insecticidas sistémicos un rango ideal o aceptable de 20 a 30 gotas/cm². Con los datos obtenidos tanto para el RPAS como para la bomba manual se obtuvieron promedios menores que los mínimos recomendados, haciendo que el nivel de eficiencia de la operación sea bajo.[20] recomiendan un rango de 50 a 70 gotas por cm². Por otro lado, se debe resaltar que los valores anteriores se enfocan en aplicaciones convencionales, evaluando solamente el agroquímico y no el equipo de pulverización.

Con RPAS hubo mayor cobertura que con la bomba, el equipo utiliza corrientes de aire para atomizar las gotas de líquido en partículas más pequeñas, obteniendo una pulverización más fina, y mayor cantidad de gotas, lo que aumenta la probabilidad de que las gotas alcancen y cubran todas las superficies de las hojas de manera más uniforme, reduciendo la deriva. Esta eficiencia se logra con la calibración adecuada de parámetros de altura de vuelo, velocidad, hora de aplicación, temperatura y humedad adecuada.

Cobertura con bomba

En el cuadro 8 se muestra que hay menos cantidad de gotas en el estrato alto, la mayor cantidad se concentra en el estrato medio y bajo, por varios factores; [21] señala que muchas veces el operador por su altura no llega a la parte alta de la planta, y hay áreas que quedan sin cubrir, generando una aplicación menos uniforme y precisa.

En el estrato medio hay mayor concentración de gotas, un promedio de (98,08±59,10) debido a que en el momento que se realizó la aplicación, el trabajador dirigió la boquilla hacia este estrato, lo que ocasionó que hubiera mayor concentración de gotas en ese segmento de la planta.

La altura del operador también puede influir en el ángulo de aplicación de las gotas; un operador más alto puede aplicar las gotas con un ángulo más agudo con respecto a la vertical, lo que podría hacer que una mayor proporción de las gotas se concentre en el estrato medio y bajo de la planta [26].

En el estrato bajo hubo un promedio de gotas de $(85,15 \pm 78,00)$, la homogenización de las gotas fue muy baja, lo cual evidencia la influencia de factores externos a la aplicación, como el viento, temperatura, humedad, la falta de implementación de coadyuvantes siliconados y la técnica de aplicación.

Las boquillas son los componentes más importantes del equipo pulverizador [26]. Una selección inadecuada de las mismas o el uso de boquillas en mal estado generalmente conduce a una disminución de los litros/ha efectivamente aplicados y puede llegar a ser necesario volver a pulverizar.

Las gotas dispersadas por la bomba son de mayor tamaño que el RPAS, así que permanecen menos tiempos en el aire y tienden a caer más rápido [20] con la boquilla del RPAS la presión en bares es mayor, formando gotas más pequeñas y uniformes, con los sistemas de calibración avanzados que tiene el equipo se puede ajustar con precisión la pulverización.

Para determinar si existen diferencias significativas entre el método RPAS y bomba se realizó la prueba de normalidad con Shapiro Wilks, y se obtuvo los siguientes resultados de las pruebas para dos medias.

Cuadro 10. Combinación de medias pareadas para resultados con bomba y RPAS.

Número de gotas									
	Alto			Medio			Bajo		
	RPAS	Bomba	p	RPAS	Bomba	p	RPAS	Bomba	p
Media	134	75	0,001	132	98	0,016	119	85	0,045
Gotas/cm²									
	Alto			Medio			Bajo		
	RPAS	Bomba	p	RPAS	Bomba	p	RPAS	Bomba	p
Media	13,57	7,6	0,001	13,37	9,9	0,017	12,01	8,6	0,041

Como se puede observar en el cuadro anterior, existen diferencias significativas ($p \leq 0,05$) para todas las comparaciones entre RPAS y Bomba de espalda, siendo el RPAS la herramienta tecnológica con mayor efectividad en las aplicaciones considerando a su vez el estrato de la planta.

Limitaciones para la medición del área de cobertura

Adicionalmente al método empleado en este estudio, existen aplicaciones como el *StainMaster*, el cual selecciona 5 puntos de la tarjeta hidrosensible y arroja un promedio en el número de gotas y sus diámetros o el *SprayGuru*, aplicación comercial muy utilizada en prácticas de agronomía de precisión. Sin embargo, su baja precisión o bajo costo limitan su uso por parte de pequeños productores o personas interesadas en evaluar la aplicación de fertilizantes foliares.

El código “detección de burbujas” de lenguaje *Python* realiza solo un conteo de las gotas, sin embargo, se deben ajustar distintos parámetros para que la lectura sea lo más precisa posible. Una gran limitante es que se debe realizar manualmente y requiere más tiempo que la aplicación de métodos comerciales como “*SprayGuru*”. Para futuros estudios es de vital importancia comparar distintos métodos para evaluar la precisión de los mismos y así poder optimizar la operación.

Costos de fertilización con bomba por hectárea.

Para fertilizar una hectárea con el método tradicional de bomba espalda, se tomó en cuenta los siguientes materiales y equipo (Cuadro 10), en el cual se contempla su precio, sin IVA debido a la exoneración en productos agropecuarios.

Cuadro 11. Precio e insumos para fertilizar una hectárea con bomba-espalda

Equipo e insumos	Precio	Fuente
Uso bomba (¢/ha)	17,46	Abonos superior
Mano obra aplicación (¢/ha)	3.750,00	Finca La Lola
Fertilizante ¹ (¢/ha)	8.322,00	Corporación agrícola Fervasa
Boquilla antideriva Mod.11002 (¢/ha)	8,67	Abonos superior
Lentes (¢/ha)	1,06	Cámara de cañeros
Guantes nitrilo ² (¢/ha)	96,00	Cámara de cañeros
Overol peto (¢/ha)	59,52	Cámara de cañeros
Mascarilla (¢/ha)	14,99	Cámara de cañeros
Total (¢/ha)	13.019,70	

¹ Se utilizó de referencia fertilizante S. Everest.

² Se utilizan 2 pares de guantes por hectárea.

Para fertilizar una hectárea en finca La Lola, incluyendo los movimientos improductivos se toma 3 horas, cada hora de trabajo se paga a ₡1500, y el jornal a ₡12.000

Se aplica un litro de fertilizante S. Everest diluido en 200 litros de agua, para cubrir una hectárea se debe llenar la bomba de 18 litros 11 veces.

La bomba de mochila tiene un valor de ₡65.987, una vida útil de 5 años calculando la depreciación se obtiene:

$$\text{Depreciación anual de bomba} = \frac{65.987}{5} = ₡13.197$$

Para calcular su uso por hectárea se divide la depreciación entre 252 días trabajados, y las 3 horas que toma fertilizar la hectárea, obteniendo ₡17,46.

El equipo de protección personal es indispensable para salvaguardar la salud del operador y reducir la exposición a los agroquímicos.

El costo en el que debe incurrir un productor o productora para fertilizar una hectárea es de ₡13.019,70

Costo por hectárea de fertilización con RPAS

Se consultó el precio a 3 empresas que brindan servicios de fumigación en el país, y se obtuvo los siguientes resultados.

Cuadro 12. Costo promedio por hectárea del alquiler de RPAS para fertilización.

Producto	Precio
Fertilizante Nitroxtend (₡/ha)	8.322,00
Coadyuvante Maxi-cover (₡/ha)	710,00
Guantes (₡/ha)	96,00
Alquiler servicio (₡/ha)	15.866,00
Total (₡/ha)	24.994,00

*Los productos anteriores se toman como referencia de las fertilizaciones de *Musa x paradisiaca* (banano) con RPAS, llevadas a cabo por la empresa Fumidrone en la provincia de Limón.

Dado que la hoja de las musáceas no tiene pubescencia, sino cierta serosidad hace que las gotas tengan mucha tensión superficial, por lo que el producto se resbala, el coadyuvante es indispensable para romper la tensión superficial de las gotas, facilitando la penetración de los fertilizantes aplicados en las hojas, se aplica 1 cc por litro total de disolución, y rinde para 5 hectáreas, teniendo un costo de ₡710 por hectárea.

Cabe destacar que, las empresas brindan acompañamiento técnico, y capacitación sobre cómo hacer las mezclas, y el uso adecuado de las moléculas.

Comparando el costo del alquiler por hectárea del RPAS **₡24.994,00** con la inversión inicial que tiene que hacer la persona productora para fertilizar manualmente **₡13.019,70** y adquirir todos los insumos necesarios, se puede apreciar que, al implementar un dron agrícola en la fertilización se tendría un aumento sobre el gasto actual con el uso de bombas de espalda.

La elección entre fertilizar con RPAS o bomba depende de varios factores; tamaño de la finca, la mano de obra disponible, presupuesto, topografía del terreno, y de las necesidades específicas del cultivo. Generalmente, el gasto que genera el proceso de fumigación varía dependiendo del número de hectáreas, debido a que la relación cantidad-precio es inversamente proporcional. A mayor número de hectáreas por fumigar el precio se verá disminuido.

Cada método presenta sus ventajas y desventajas, para áreas pequeñas lo más recomendable es utilizar el método tradicional, debido a que el área a fertilizar se puede cubrir en poco tiempo, y el pago de los jornales es más accesible que alquilar el RPAS; igualmente para la empresa fumigadora no es atractivo desplazarse grandes distancias para cubrir menos de 10 hectáreas. Pero si se poseen grandes o medianas extensiones de tierra, en términos de eficiencia, precisión, tiempo, ahorro de recursos, el uso de RPAS es más funcional.

Los beneficios que brinda esta tecnología se pueden visualizar durante todo el ciclo productivo, se minimiza el impacto ambiental, la compactación de suelos, se reduce la cantidad de agua y los tiempos de aplicación, aplicaciones se realizan en momentos adecuados para la planta, y para la aplicación como tal [17].

Con RPAS se puede trabajar volúmenes de 12-20 litros/ha, y alcanzar mayores rendimientos en el cultivo de *M. textilis*. La carga química del fertilizante/ha es la misma solo que con RPAS va a una mayor concentración, debido a que el vehículo que es el agua es menor, gracias a esto la tasa de efectividad de la aplicación es mayor, dando como resultado un mejor aprovechamiento en los productos que se apliquen [8].

En la tesis realizada por Arboleda & Massuh [17] encuestaron a 353 agricultores, de los cuales, 343 indicaron que el factor principal que toman en cuenta para seleccionar su proveedor de fumigación es la calidad del servicio prestado, como segundo punto, los productores prefieren a las empresas que otorgan créditos y facilidades de pago. El precio y el prestigio del servicio de fumigación son considerados en un tercer y cuarto puesto respectivamente, por tal razón es indispensable comprender la relación costo/beneficio que significa la implementación de RPAS, y se debe hacer una comparación del coste que significa adaptarlos a los procesos de producción agrícola en las plantaciones bananeras vs la productividad que se puede alcanzar al reducir ciertos factores no deseados en la cosecha. Los beneficios pueden superar los costos a largo plazo [17].

Con esta información se puede impulsar que las empresas fumigadoras en el país brinden sistemas de crédito, y aumentar la accesibilidad al servicio.

Según un informe del INEC, el costo de producir banano asciende a \$1234.83 por hectárea, si se aplicará el nuevo sistema con RPAS, se podría disminuir el costo de los plaguicidas aproximadamente en un 70 % debido a la precisión del equipo se lograría focalizar correctamente el fertilizante o plaguicida [17].

La información anterior también es respalda por los resultados obtenidos de las empresas nacionales Fumidrone e Indigo drones donde sugieren que es posible obtener una reducción de hasta un 20% de las aplicaciones por ciclo. Si se tiene una buena eficacia en la aplicación se logra disminuir hasta un 25% la dosis de agroquímicos [8].

Conclusiones

El tiempo promedio de la fertilización con RPAS es de 9 minutos por hectárea, con el método tradicional se requiere de 3 horas para cubrir la misma área.

Para fertilizar grandes extensiones de tierra es más funcional y eficiente el uso de RPAS, para áreas pequeñas de 1 a 10 hectáreas la bomba-espalda es más rentable.

El área de cobertura utilizando RPAS es mayor que con la bomba-manual, hay mayor cantidad de gotas en los 3 estratos.

El costo de alquilar el servicio del RPAS es de ₡24.994 por hectárea, para que sea rentable para la empresa fumigadora se requieren más de 10 hectáreas, y depende de la distancia de las fincas.

El costo de fertilizar una hectárea con bomba de espalda es de ₡13.019 por hectárea.

Recomendaciones

Para futuros estudios de este tipo, se recomienda:

- Tomar las fotos de las tarjetas hidrosensibles a una misma altura, con un solo celular o cámara fotográfica para que las fotos tengan la misma resolución.
- Reforzar la búsqueda de códigos con lenguaje de programación para lograr la automatización de procesos.
- No colocar grapa para sostener la tarjeta, al momento de procesar la imagen genera ruido y se pierde área.
- Colocar clips en el borde de la tarjeta para que no afecte mucho su lectura, o colocarlo en el centro de la misma y se analizan los extremos.
- Cuidar la altura y velocidad de vuelo para que el RPAS lo bote o desacomode las tarjetas y la lectura nos salga mal.
- Volar el RPAS después de la lluvia para que las hojas pierdan humedad al momento de moverse y no haya interferencia o pérdida de las tarjetas hidrosensibles.
- Si se cuenta con los recursos económicos adquirir una licencia en SprayGuru para que la lectura de las tarjetas sea más precisa y en menos tiempo.
- Utilizar un fertilizante en específico y coadyuvante para validar los estudios de aplicaciones.
- Con una cámara multiespectral tomar fotografías y calcular índices de vegetación para aumentar la precisión en las dosis de fertilizante requeridos por las plantas.
- Seguir apoyando este tipo de investigaciones para lograr una silvicultura de precisión sostenible y aumentar rendimientos.

Agradecimientos

A mi familia, por ser mi luz y apoyo, este logro también es de ustedes.

A mis compañeros de la u, que la vida los convirtió en amigos del alma, Hemerson, Isaac, Josué Zeledón, gracias por su amistad y apoyo en todo, hicieron de la vida universitaria un mejor lugar.

Al profesor Mario Guevara Bonilla por su colaboración y motivación, al profe Dagoberto Arias por ayudarme con la búsqueda de las fincas y logística. Sus conocimientos, enseñanzas, y críticas han sido fundamentales.

A la empresa Indigo Drones, por suministrar el equipo; y a Fidel Alexander López por su disponibilidad y colaboración durante todo el proceso.

A Daniel Rojas, encargado de la empresa Fumidrone, su ayuda fue indispensable para poder concluir este trabajo, gracias por su tiempo, dedicación y explicarme conceptos muy técnicos.

A Luis Diego Jiménez en representación del CATIE.

A Víctor por estar presente en el momento justo, por su ánimo y ayuda.

A José Coto que estuvo desde el inicio de la idea, por su motivación y amistad.

A Arnoldo Ramírez por la paciencia y colaboración en el tema de programación, a Kevin Arias por su ayuda y disponibilidad de atender mis consultas.

Referencias

- [1] A.I. Basco, G. Beliz, D. Coatz and P. Garnero, "Industria 4.0: fabricando el futuro", vol. 647, 2018.
- [2] I.H. Beloev, "A review on current and emerging application possibilities for unmanned aerial vehicles", *Acta technologica agriculturae*, vol. 19, no. 3, pp. 70-76, 2016.
- [3] T.P. Banu, G.F. Borlea and C. Banu, "The use of drones in forestry", *Journal of Environmental Science and Engineering B*, vol. 5, no. 11, pp. 557-562, 2016.
- [4] I. Colomina and P. Molina, "Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review", *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*, vol. 92, pp. 79-97, 2014.
- [5] U.R. Mogili and B. Deepak, "Review on application of drone systems in precision agriculture", *Procedia computer science*, vol. 133, pp. 502-509, 2018.
- [6] A. Quirós-Ramírez, M.E.V. Hernández and A.A. Zamora, "Agricultura de precisión y agro costarricense", Informe hacia la Sociedad de la Información y el Conocimiento, 2021.
- [7] DJI AGRICULTURE, "Fertilización foliar en países asiáticos", [En línea]. Disponible: <https://indigodrones.com/noticias/tag/DJI+Agras> .
- [8] D. Rojas "Experiencia en la fertilización foliar con drones agrícolas", (Comunicación privada), 2023.
- [9] K.J. Quesada, J.M. Molina, M. Araya, D.A. Aguilar, J.C.V. Otárola, K.A. Ceciliano, F.M. Acosta, A.M.C. Calvo and G.G. Monge, "Avances en las investigaciones realizadas en cultivos de abacá establecidos en Costa Rica con especial referencia a los sistemas agroforestales", *Tecnología en Marcha*, vol. 35, no. 2, pp. 50-59, 2022.

- [10] CATIE (Centro Agronómico de Investigación y Enseñanza Tropical). datos Meteorológicos (en línea). Cartago, Costa Rica, 2023.
- [11] R. Bazán, "Soil survey of La Lola cacao farm", 1963.
- [12] Indigo Drones (2023, octubre 17). Modelos DJI Agras. [En línea] Disponible: <https://indigodrones.com/>
- [13] B. Louman, M. Gómez, G. Navarro, L. Orozco, C. Brumér and D. Quirós, "Determinación de costos, productividad y rendimientos del aprovechamiento forestal," Aprovechamiento de impacto reducido en bosques latifoliados húmedos tropicales. Eds. L. Orozco, C. Brumér, pp. 278-312, 2006.
- [14] J.R. Navia Zamora, "Optimización del proceso de fumigación agrícola mediante la utilización de los drones", 2019.
- [15] Q. Cordero, "Aprovechamiento forestal: versión revisada. Instituto Tecnológico de Costa Rica, San José, 1989.
- [16] O. Murillo, "Índices de calidad para la reforestación en Costa Rica", Agronomía costarricense, vol. 24, no. 2, pp. 41-47, 2000.
- [17] G. Arboleda and F. Massuh, "Análisis de factibilidad del uso de drones en las plantaciones bananeras de la provincia de El Oro", Proyecto de Graduación Presentado Para Cumplir Con Los Requisitos Finales Para La Obtención Del Título de Ingeniero En Comercio y Finanzas Internacionales Bilingüe. Universidad Católica de Santiago de Guayaquil. Facultad de Especialidades Empresariales. G, 2014.
- [18] C. Barrera Barrea and J. Vallejo Delgado, "Servicio de fumigación con drones para plantaciones bananeras en la provincia del Guayas", Tesis magistral, Escuela de administración de empresas, 2018.
- [19] J. Lara Gavira, "Desarrollo de dispositivo de optimización de consumo de una bomba de riego", Tesis, Universidad de Sevilla, 2020.

- [20] S.N. Arriaga García. " Eficiencia del uso de drones en el control de sigatoka negra (*Mycosphaerella fijiensis*)", Tesis, Universidad de Guayaquil-facultad de ciencias agrarias, 2022.
- [21] M. Al Heidary, J.P. Douzals, C. Sinfort and A. Vallet, "Influence of spray characteristics on potential spray drift of field crop sprayers: A literature review", *Crop protection*, vol. 63, pp. 120-130, 2014.
- [22] ASABE. American society of agricultural and biological engineers, [En línea] Recuperado: <https://www.asabe.org/>
- [23] C.A. Renaudo, "Modelo predictivo de la deriva de pulverización en aplicaciones agrícolas de botalón", Tesis Doctoral, Universidad Nacional del Sur, 2020.
- [24] R. MERRETT, "Crop Desiccation with Minimum Spray Drift1 ", *EPPO Bulletin*, vol. 13, no. 3, pp. 413-417, 1983.
- [25] V.H. Merani, M. Mur, F. Ramírez, M.J. Ponce, F.D. Guilino and T. Palancar, "Efecto de variables operativas sobre la calidad de aplicación y la deriva en la pulverización de agroquímicos," *AgriScientia*, vol. 36, 2019.
- [26] K.C. Vázquez Arroyo, H.C. Ramos Herrera, D.M. García Gómez and J.L. Hernandez Arellano, "Evaluación ergonómica del uso de bombas portátiles para fumigar," *ERGONOMÍA OCUPACIONAL*, pp. 108.

Anexos

Anexo 1. Formularios de campo para determinar los tiempos y movimientos con RPAS.

Estudio tiempos y movimientos		
Actividad:		
# de lote:		
Fecha de evaluación:		
Área		
Hora de inicio:		
Hora final:		
Observado por:		
Nota: Observaciones cada 1 minuto		
Movimientos productivos	N° de observaciones	Tiempo del ciclo
Llenado del tanque		
Purgar		
Prender RPAS		
Despegue RPAS		
Fertilización del área		
Aterrizaje		
Tiempo total		
Movimientos improductivos	N° de observaciones	Tiempo del ciclo
Cambio baterías RPAS		
Lluvia		
Fuertes vientos		
Pérdida de señal		
Tiempo total		

Formulario para determinar tiempos y movimientos con bomba.

Estudio tiempos y movimientos		
Actividad:		
# de lote:		
Fecha de evaluación:		
Hora de inicio:		
Hora final:		
Observado por:		
Nota: Observaciones cada 1 minuto		
Movimientos productivos	N° de observaciones	Tiempo del ciclo
Llenado del tanque		
Acomodo de bomba		
Fertilización del área		
Tiempo total		
Movimientos improductivos	N° de observaciones	Tiempo del ciclo
Descanso		
Alimentación del operario		
Mantenimiento de la bomba		
Lluvia		
Otros		
Tiempo total		

Anexo 2. Código para realizar el conteo automático de gotas en *Spyder*

```
CONTEOGOTAS.py x
1  import cv2
2  import numpy as np
3  image = cv2.imread('C:\\COBERTURA\\DRONE\\A5.jpg',0)
4  # Set our filtering parameters
5  # Initialize parameter setting using cv2.SimpleBlobDetector
6  params = cv2.SimpleBlobDetector_Params()
7
8  # Set Area filtering parameters
9  params.filterByArea = True
10 params.minArea = 8
11
12 # Set Circularity filtering parameters
13 params.filterByCircularity = True
14 params.minCircularity = 0.40
15
16 # Set Convexity filtering parameters
17 params.filterByConvexity = True
18 params.minConvexity = 0.50
19
20 # Set inertia filtering parameters
21 params.filterByInertia = True
22 params.minInertiaRatio = 0.055
23
24 # Create a detector with the parameters
25 detector = cv2.SimpleBlobDetector_create(params)
26
27 # Detect blobs
28 keypoints = detector.detect(image)
29
30 # Draw blobs on our image as red circles
31 blank = np.zeros((1, 1))
32 blobs = cv2.drawKeypoints(image, keypoints, blank, (0, 0, 255),
33                          cv2.DRAW_MATCHES_FLAGS_DRAW_RICH_KEYPOINTS)
34 number_of_blobs = len(keypoints)
35 text = "No. Gotas: " + str(len(keypoints))
36 cv2.putText(blobs, text, (20, 100),
37            cv2.FONT_HERSHEY_SIMPLEX, 1, (0, 100, 255), 2)
38 # Show blobs
39 cv2.imshow("Contador de Gotas", blobs)
40 cv2.waitKey(0)
41 cv2.destroyAllWindows()
```