

INTEGRACIÓN DEL ENTORNO BIOFÍSICO DEL VIÑEDO *en la optimización de rutas de drones para mejorar la gestión agrícola*

En este artículo presentamos un nuevo sistema para la planificación de rutas de drones para cultivos en seto, que combina tecnología avanzada y análisis de datos. El enfoque se basa en la integración del estado actual del viñedo mediante la creación de modelos digitales detallados del campo, utilizando datos de alta precisión obtenidos mediante LiDAR, o en su defecto, mediante fotogrametría.

SERGIO VÉLEZ^{1,2*}, GONZALO MIER², MAR ARIZA-SENTÍS^{2,3}, JOÃO VALENTE^{2,4}

¹ Universidad de Burgos, España

² Universidad de Wageningen, Países Bajos

³ SERESCO, España

⁴ Consejo Superior de Investigaciones Científicas, España

*Correo: svmartin@ubu.es

Los drones o vehículos aéreos no tripulados (UAVs, por sus siglas en inglés) han cobrado protagonismo en el ámbito de la agricultura de precisión debido a su capacidad para realizar mapeos rápidos y detallados de áreas extensas y de difícil acceso mediante métodos tradicionales (Zhang *et al.*, 2022). Equipados con tecnologías como GNSS, sensores multiespectrales y cámaras de alta resolución, los drones permiten hacer operaciones, como tratamientos fitosanitarios, o recopilar datos precisos para evaluar la salud de los cultivos, identificar zonas afectadas por plagas o enfermedades y monitorear el rendimiento y desarrollo de la vegetación (Hassan *et al.*, 2019; Vélez *et al.*, 2023). Sin embargo, uno de los principales desafíos actuales es la optimización

de la planificación de rutas de los drones para maximizar su eficiencia y eficacia en tareas agrícolas. La planificación de rutas es esencial para asegurar que los drones cubran el área de interés de la manera más eficiente posible, minimizando el tiempo de vuelo y el consumo de energía (Fevgas *et al.*, 2022). Los métodos tradicionales de planificación de rutas suelen basarse únicamente en la geometría del campo, sin considerar las condiciones específicas del entorno biofísico, es decir, sin tener en cuenta la distribución real de la vegetación.

Esta limitación es particularmente importante en sistemas de setos y cultivos leñosos, como viñedos y otros cultivos en espaldera, donde la vegetación puede variar significativamente en densidad, altura y distribución. Además, el cambio cli-

mático agrava esta complejidad al introducir condiciones meteorológicas impredecibles, periodos de sequía y brotes de plagas que impactan tanto la vegetación como la salud general de los cultivos (Ahmed *et al.*, 2020). Por ello, resulta esencial desarrollar métodos de planificación de rutas que integren información sobre el estado actual del campo. Incorporar estos datos en la planificación de rutas no solo puede mejorar la precisión de la captura de información por parte de los drones, sino que también optimiza las operaciones en el viñedo, permitiendo vuelos específicos sobre áreas de interés, como el suelo o la vegetación (**Figura 1**).

En este artículo presentamos un nuevo sistema para la planificación de rutas de drones para cultivos en seto, que combina tecnología avanzada y análisis de datos. Nuestro enfoque

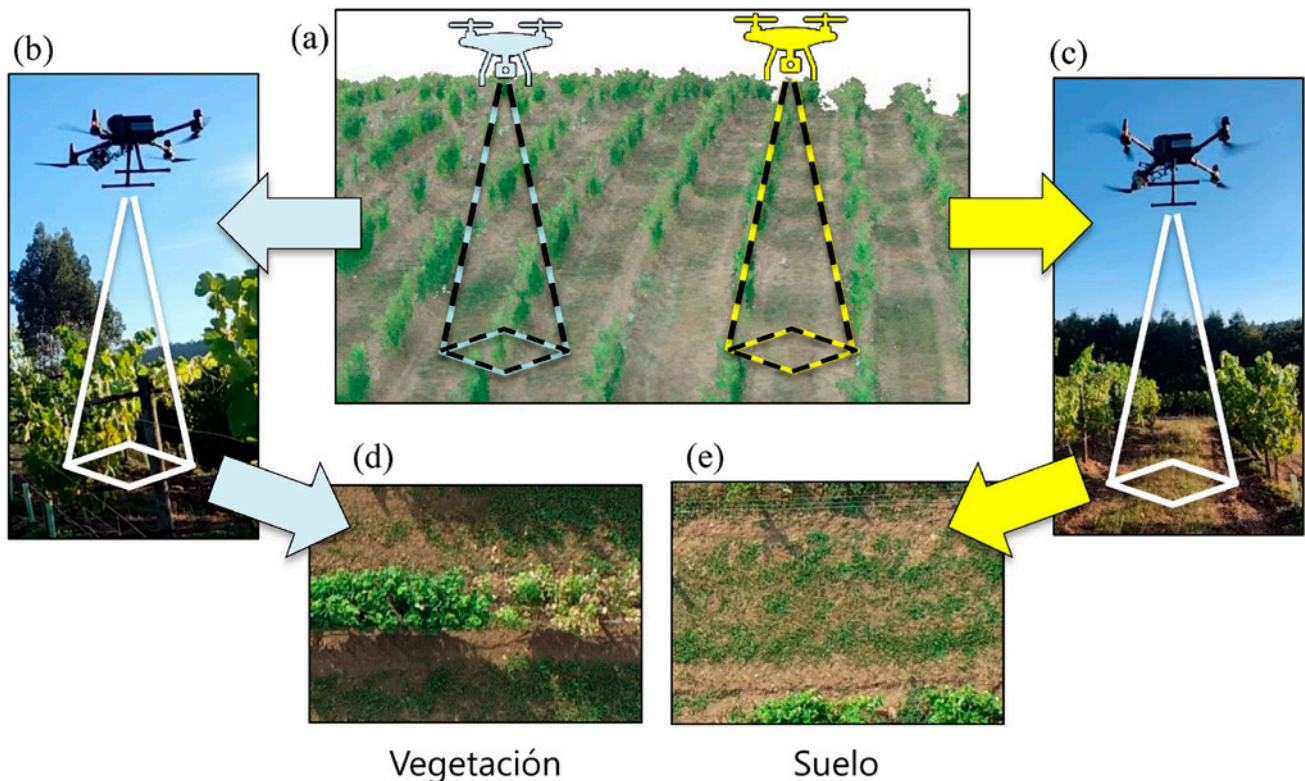


FIGURA 1

La incorporación del entorno biofísico del campo agrícola (incluyendo el estado actual de la vegetación) en la planificación de rutas mejora la captura de datos de los drones y optimiza las operaciones en el viñedo. a) Diagrama que muestra drones sobrevolando la nube de puntos del viñedo, b) dron volando sobre la vegetación, c) dron volando sobre el suelo, d) imagen enfocada en la vegetación, y e) imagen enfocada en el suelo. Adaptado de (Vélez *et al.*, 2025).

se basa en la integración del estado actual del viñedo mediante la creación de modelos digitales detallados del campo, utilizando datos de alta precisión obtenidos mediante LiDAR, o en su defecto, mediante fotogrametría. Estos modelos sirven como entrada de datos para un algoritmo de planificación de rutas que se adapta a las condiciones específicas del campo, considerando el entorno biofísico actual y asegurando que las rutas estén alineadas con las hileras de cultivo y se adapten a los cambios en la vegetación.

Materiales y métodos

El estudio se llevó a cabo en julio de 2022 en un viñedo comercial propiedad de Bodegas Terras Gauda, S.A., ubicado en Tomiño, Pontevedra,

Galicia, España de la variedad *Vitis vinifera* cv. Loureiro, parte de la Denominación de Origen "Rías Baixas". La gestión del viñedo se realizó de acuerdo con el protocolo de la DO y la legislación aplicable, permitiendo el crecimiento de especies vegetales espontáneas como cubierta vegetal entre las hileras de vid.

Se utilizaron dos drones para recopilar datos de teledetección. El primero fue el DJI Phantom 4 RTK, equipado con una cámara de 20 megapíxeles y capacidad de posicionamiento RTK (Cinemática en Tiempo Real, por sus siglas en inglés). Este dron se utilizó para obtener imágenes de alta resolución del viñedo, con la cámara apuntando directamente hacia abajo y en un ángulo de 45°, y con un solapamiento de imágenes del 70-80%.

Las imágenes se procesaron utilizando el software Agisoft Metashape Professional v1.8.5. Este software implementa el algoritmo SfM para crear nubes de puntos 3D a partir de las imágenes 2D. Los pasos clave incluyen (**Figura 2, derecha**):

1. Alineación de imágenes: se detectan y coinciden características entre las imágenes para determinar la posición y orientación de la cámara en cada toma.
2. Generación de nube de puntos densa: se crea una nube de puntos detallada que representa la superficie del terreno y la vegetación.
3. Clasificación de puntos: los puntos se clasifican en "suelo" y "no suelo" utilizando herramientas de clasificación automática basadas

en la diferencia de altura local y la pendiente del terreno.

4. Generación del Modelo Digital de Terreno (DTM) y del Modelo Digital de Superficie (DSM): el DTM representa la superficie del suelo, mientras que el DSM incluye la altura de la vegetación y otras estructuras.

5. Cálculo del Modelo Digital de Altura del Dosel (CHM): se obtiene restando el DTM del DSM, resul-

tando en un modelo que representa la altura de la vegetación.

El segundo dron utilizado fue el DJI M300 RTK con sensor Zenmuse L1, un sistema que combina LiDAR con una cámara RGB, permitiendo la obtención de nubes de puntos 3D detalladas y modelos digitales de elevación. Los datos LiDAR y las imágenes RGB capturados por el DJI M300 RTK se procesaron uti-

lizando el software DJI Terra. Los pasos incluyen (**Figura 2, izquierda**):

1. Integración de datos: se combinan los datos LiDAR con las imágenes RGB para generar nubes de puntos 3D con información de color.
2. Clasificación de puntos: se separan los puntos del suelo de los de la vegetación con el plugin CSF en el software CloudCompare.
3. Generación de DTM, DSM y

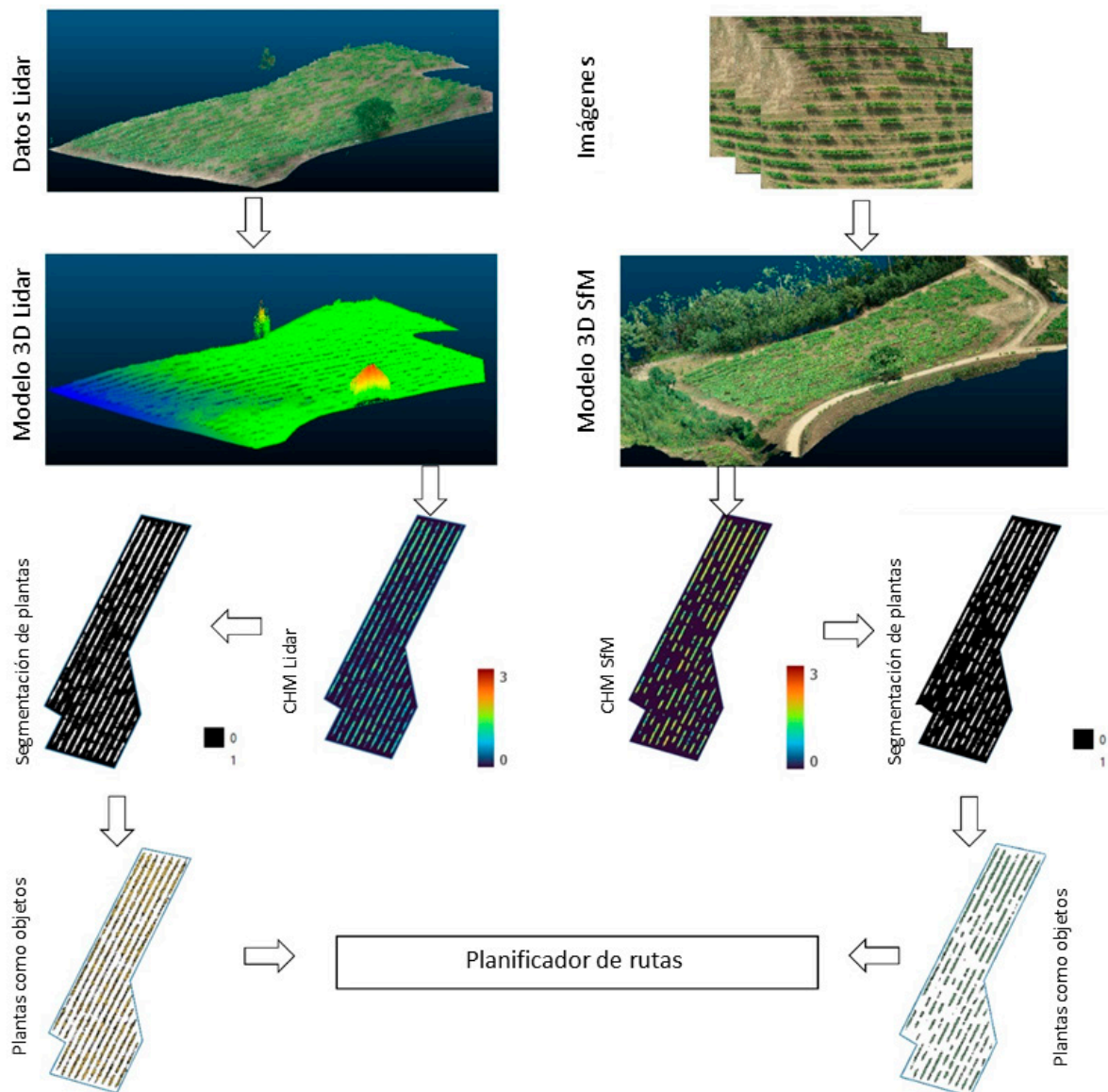


FIGURA 2

Entrada de datos para el algoritmo de planificación de rutas. A la izquierda, el flujo de trabajo procesa datos del LiDAR, y a la derecha, de imágenes y SfM (Estructura a partir del Movimiento) para crear el CHM (Modelo de Altura del Dosel). Estas entradas de datos integran tanto el entorno biofísico como la geometría de la parcela o ROI (Región de Interés). Adaptado de (Vélez *et al.*, 2025).

CHM: al igual que con los datos de SfM, se generan los modelos digitales necesarios para representar la altura y distribución de la vegetación.

Finalmente, desarrollamos un algoritmo de planificación de rutas implementado en el software de modelado Matlab, diseñado para optimizar las trayectorias de los drones en entornos agrícolas con hileras de vegetación (**Figura 3, izquierda**). El algoritmo sigue los siguientes pasos:

1. Entrada de datos: recibe el CHM y la región de interés (ROI) como insumos.
2. Limpieza de datos: elimina vegetación fuera de la ROI y filtra pequeñas copas de vegetación o ruido por debajo de un umbral definido.
3. Rotación del dosel: rota la repre-

La planificación de rutas es esencial para asegurar que los drones cubran el área de interés de la manera más eficiente posible

sentación del dosel para alinear las hileras con el eje y, probando ángulos entre 0° y 180°.

4. Agrupación en hileras: las copas se agrupan en hileras basadas en

la proximidad horizontal de sus centros.

5. Ordenamiento de hileras y copas: se ordenan las hileras de izquierda a derecha y las copas dentro de cada hilera de abajo a arriba o viceversa dependiendo de la paridad de la hilera.
6. Generación de la ruta: las hileras ordenadas y orientadas se concatenan para generar la ruta siguiendo el centro de las copas.

Resultados y discusión

Como observación inicial, y como era de esperar, el uso de datos LiDAR proporcionó una mayor precisión en la detección de la vegetación, identificando más copas y detalles finos de las plantas. Sin embargo, esto resultó en rutas ligeramente más largas debido a la mayor cantidad de vegetación detectada. Además, el procesamiento de datos



FORMULACIÓN EXCLUSIVA
lainco
PROTECTING LIFE SINCE 1934

sivar gold®

FUNGICIDA SISTÉMICO
PARA EL CONTROL DE
MILDIU EN VID



LiDAR requirió más tiempo en comparación con el enfoque basado en SfM. Esto implica un compromiso entre la precisión y la eficiencia que debe considerarse según los requisitos específicos de la aplicación.

Por otra parte, los resultados de nuestro algoritmo mostraron que produjo rutas más cortas y eficientes en comparación con los métodos tradicionales basados únicamente en la geometría del campo. En promedio, se logró una reducción de hasta el 6,41% en la longitud total de las rutas para el área completa de estudio (**Figura 3, derecha**). Para operaciones focalizadas, la reducción en la longitud de las rutas fue aún más significativa, alcanzando hasta un 38,70% en áreas con menor densidad de vegetación. Esto demuestra aún más la eficacia de nuestro sistema en condiciones de vegetación heterogénea, donde los métodos tradicionales no adaptan las rutas a las variaciones en la distribución de la vegetación.

Debido a estos resultados, se demuestra que nuestro método es eficiente al permitir que los drones vuelen directamente sobre las zonas de interés, evitando sobrevolar áreas innecesarias. Por ejemplo, si el interés está en la vegetación, se evitarán áreas innecesarias como el suelo para optimizar tareas como:

- Inspección del dosel: al volar más cerca y directamente sobre las plantas, se obtienen imágenes de mayor resolución, mejorando la detección de problemas como enfermedades, plagas o estrés hídrico.
- Pulverización dirigida: la aplicación precisa de productos fitosanitarios y nutrientes reduce el desperdicio y el impacto ambiental, mejorando la sostenibilidad de las prácticas agrícolas.
- Monitoreo del crecimiento: permite un seguimiento más detallado del desarrollo de los cultivos, facilitando la toma de decisiones informadas para prácticas como la poda o la fertilización.

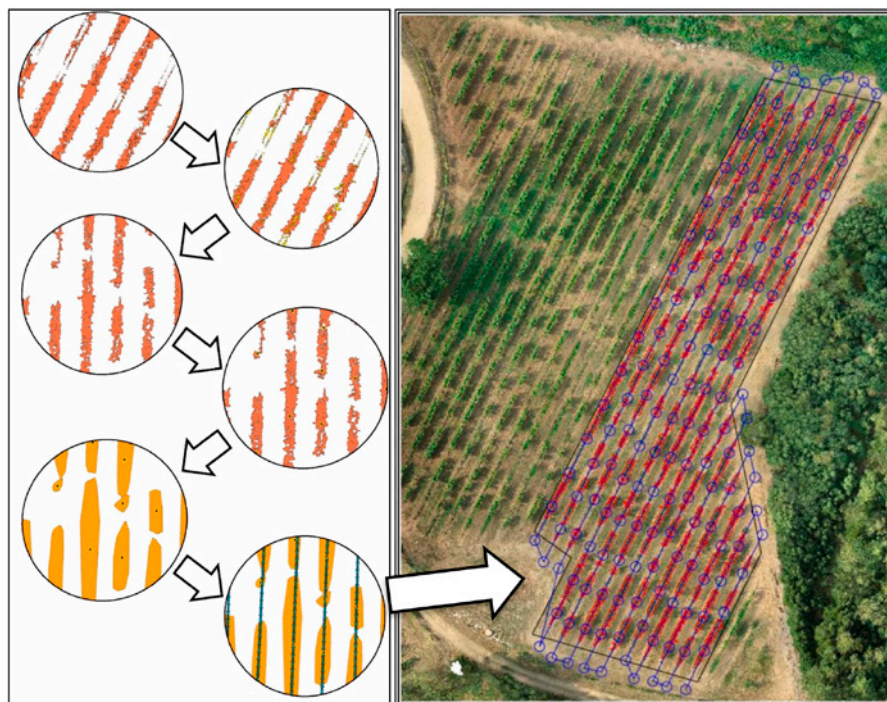


FIGURA 3

Izquierda: algoritmo de planificación de rutas diseñado para optimizar las trayectorias de los drones en entornos agrícolas con hileras de vegetación. Derecha: resultado del algoritmo donde se muestra la trayectoria real calculada mediante la metodología propuesta. Las hileras ordenadas y orientadas se concatenan para generar la ruta siguiendo el centro de las copas. El fondo de la imagen es el ortomosaico de la parcela agrícola, sobre el cual se superponen las rutas planificadas (en azul), que muestran el recorrido optimizado del algoritmo, considerando la geometría y distribución de la vegetación (en rojo) de la parcela. Adaptado de (Vélez *et al.*, 2025).

Agradecimientos

Este trabajo se realizó en el marco del proyecto H2020 FlexiGroBots, que ha sido financiado por la Comisión Europea en el ámbito de su programa H2020 (número de contrato 101017111). Los autores agradecen la valiosa ayuda y

contribuciones de Bodegas Terras Gauda, S.A. y todos los socios del proyecto.

Bibliografía

Queda a disposición del lector interesado en el correo electrónico: redaccion@editorialagricola.com

A MODO DE CONCLUSIÓN

Nuestros resultados demuestran que es esencial considerar tanto la geometría del campo como el estado actual de la vegetación para optimizar las operaciones con drones en agricultura de precisión. El sistema de planificación que presentamos mejora significativamente la planificación de rutas de drones en sistemas en espaldera (o sistemas de setos) al considerar el entorno biofísico actual del campo. Al incorporar datos detallados del estado real de la vegetación y adaptar las rutas en consecuencia, es posible aumentar la eficiencia operativa y mejorar la gestión sostenible y eficiente de cultivos leñosos para tareas como el monitoreo o la pulverización dirigida.