Viabilidad técnica, económica y ambiental con análisis de mercado de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) propulsados por celdas de hidrógeno para Colombia

Viviana Andrea Montaño, Sebastián Mesa y Gerardo Andrés Delgado

Universidad EAN

Facultad de ingeniería

Ingeniería en Energías

Bogotá, Colombia

Junio/2026

Viabilidad técnica, económica y ambiental con análisis de mercado de Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) propulsados por hidrógeno para Colombia

Viviana Andrea Montaño Acosta, Sebastián Mesa y Gerardo Andrés Delgado

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

Ingenieros en Energías

Director (a):

Lina María Chacón

Modalidad:

Creación de Empresa

Universidad EAN

Facultad

Programa

Bogotá D.C., Colombia

Junio de 2026

Resumen:

El proyecto evalúa la viabilidad de implementar drones impulsados por celdas de combustible de hidrógeno en Colombia, ante las limitaciones de autonomía de los VANT eléctricos. Se emplea una metodología de enfoque mixto, basada en revisión de literatura, análisis del entorno, entrevistas a expertos y estudio de clientes. Los resultados permiten identificar oportunidades de mercado, barreras de adopción y condiciones económicas para la implementación, concluyendo que el hidrógeno representa una alternativa prometedora para aplicaciones de larga duración.

Palabras clave:

- Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT)
- Celdas de combustible de hidrógeno
- Estudio de viabilidad
- Análisis de mercado.

Tabla de contenido

1. Introducción 6

Planteamiento del problema 6

Pregunta de investigación 7

Objetivo General 7

Objetivos Específicos 7

2. Justificación 7

3. Marco teórico 8

Contexto y antecedentes 8

Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) 9

Pilas de combustible de hidrógeno: fundamentos y aplicación en VANT 21

Marco normativo y estratégico del hidrógeno y los VANT: enfoque en Colombia 26

4. Estado del Arte 30

Revisión sistemática PRISMA 30

Identificación 30

Cribado 31

Idoneidad ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Diagrama de flujo metodología PRISMA 38

5. Metodología de análisis y evaluación de viabilidad 42

6. Análisis de mercado y aplicaciones de VANT impulsados por Hidrogeno 44

Análisis del entorno 44

Estudio de mercado 49

Estudio de clientes 61

Validación del mercado ..... **¡Error! Marcador no definido.**

7. Modelo de negocio 71

8. Resultados y discusión: Evaluación de la viabilidad de VANT impulsados por Hidrogeno en Colombia 74

Resultados del análisis de viabilidad técnica 74

Resultados del análisis de viabilidad de mercado 75

Resultados del análisis de viabilidad económica 76

Discusión integrada de resultados ..... **¡Error! Marcador no definido.**

Implicaciones estratégicas para Colombia..... **¡Error! Marcador no definido.**
9. Conclusiones específicas por dimensión de análisis 79
Viabilidad técnica..... **¡Error! Marcador no definido.**
Viabilidad económica ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Viabilidad de mercado ..... **¡Error! Marcador no definido.**
Aportes de la investigación..... **¡Error! Marcador no definido.**
Recomendaciones..... **¡Error! Marcador no definido.**
10. Bibliografía 80

1. Introducción

Planteamiento del problema

El uso de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) en Colombia ha aumentado en los últimos años, especialmente en aplicaciones relacionadas con la inspección de infraestructura energética, el monitoreo ambiental, la agricultura de precisión y la vigilancia de grandes extensiones territoriales. Sin embargo, la expansión de estos servicios se ha visto limitada por restricciones técnicas en el mercado. La limitada autonomía de vuelo de los VANT eléctricos obliga a distribuir las operaciones en múltiples misiones de corta duración, incrementando los tiempos de ejecución, los costos operativos y los riesgos logísticos, normalmente en zonas de difícil acceso. Esta situación resulta crítica en el contexto colombiano, donde la geografía montañosa y las condiciones climáticas variables demandan soluciones aéreas con mayor capacidad de operación continua y alcance extendido.

Ante esta problemática, las celdas de combustible de hidrógeno han surgido como una alternativa tecnológica capaz de superar las restricciones energéticas de los sistemas eléctricos convencionales, al ofrecer mayor densidad energética y tiempos de vuelo prolongados. A nivel internacional, esta tecnología ha demostrado su viabilidad técnica en plataformas UAV de larga duración; sin embargo, su adopción en Colombia enfrenta desafíos significativos. En este contexto, existe una brecha de información relevante que impide a empresas, inversionistas y entidades del Estado tomar decisiones fundamentadas sobre la adopción de VANT propulsados por hidrógeno en el país. La ausencia de un análisis integral que articule los aspectos técnicos, económicos, ambientales, normativos y de mercado limita la evaluación objetiva de esta tecnología como una solución viable para las necesidades operativas actuales de Colombia.

Pregunta de investigación

¿Es viable, desde una perspectiva técnica, económica y comercial, la adopción de Vehículos Aéreos No Tripulados propulsados por celdas de combustible de hidrógeno en el mercado colombiano?

Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnica y económica de la implementación de drones propulsados por celdas de combustible de hidrógeno para la agricultura de precisión en el contexto geográfico y de mercado de Colombia.

Objetivos Específicos

- Determinar las necesidades operativas y limitaciones actuales de los drones propulsados por Hidrogeno comerciales en el entorno de la agricultura de precisión.
- Descubrir el nivel de interés del mercado colombiano en soluciones de drones basados en hidrogeno y el posible escenario de aplicación en el país.
- Analizar los costos asociados a la adquisición de VANT propulsados por hidrógeno, y compararlos con los de sistemas eléctricos convencionales, con el fin de estimar su viabilidad económica en el contexto colombiano.

2. Justificación

El desarrollo de tecnologías basadas en Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) ha demostrado un alto potencial en distintos sectores productivos, sin embargo, su adopción sigue limitada principalmente por la baja autonomía de los sistemas energéticos convencionales. En este contexto, la presente investigación se justifica por la necesidad de buscar alternativas que permitan superar esta desventaja, considerando las condiciones particulares de Colombia. Desde el punto de vista técnico, el uso de celdas de combustible

de hidrógeno representa una oportunidad para aumentar el tiempo de vuelo y el alcance operativo de los drones. No obstante, es necesario evaluar su comportamiento en condiciones reales del país. En términos económicos, el estudio busca determinar si esta tecnología es viable frente a los drones tradicionales, teniendo en cuenta los costos de inversión, operación y mantenimiento, así como la limitada infraestructura de hidrógeno en Colombia. Adicionalmente, desde una perspectiva ambiental y de mercado, el hidrógeno se presenta como una alternativa emergente alineada con la transición energética y con el plan energético nacional (PEN), aunque aún existe poca información sobre su adopción en el país. Por esa razón es importante conocer la percepción de expertos y posibles clientes, lo cual permitirá identificar oportunidades y barreras para su implementación.

3. Marco teórico

Contexto y antecedentes

En los últimos años, los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), también conocidos como drones, han pasado de ser dispositivos de uso recreativo a consolidarse como herramientas estratégicas en múltiples sectores productivos. Su capacidad para realizar operaciones de monitoreo, inspección y recolección de datos de manera remota y eficiente ha impulsado su adopción en áreas como la agricultura de precisión, la inspección de infraestructuras energéticas, la vigilancia ambiental y la logística especializada.

Este crecimiento se ha visto acompañado por una evolución constante en sensores, sistemas de navegación y plataformas de vuelo, lo que ha ampliado significativamente el rango de aplicaciones comerciales de los VANT a nivel global. En países con geografías complejas y extensas áreas rurales, estas tecnologías representan una alternativa eficiente frente a métodos tradicionales de inspección terrestre, al reducir tiempos, costos operativos y riesgos para el personal humano.

En el caso colombiano, la adopción de drones presenta un interés particular debido a las características del territorio nacional, marcado por la presencia de tres cordilleras,

zonas de difícil acceso y una alta concentración de infraestructura lineal crítica, como oleoductos, líneas de transmisión eléctrica y redes viales. Estas condiciones convierten a los VANT en una herramienta clave para mejorar la cobertura y eficiencia de operaciones en sectores estratégicos del país.

Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT)

Los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), conocidos internacionalmente como Unmanned Aerial Vehicles (UAV), son aeronaves capaces de operar sin un piloto a bordo, ya sea mediante control remoto o con distintos niveles de autonomía, apoyados en sistemas de navegación, control y comunicación. En un sentido más amplio, el término se integra dentro del concepto de Unmanned Aircraft Systems (UAS), el cual no solo contempla la aeronave, sino también la estación de control en tierra, los enlaces de comunicación y los sistemas de soporte necesarios para la operación segura del vehículo.

Originalmente, el desarrollo de los VANT estuvo fuertemente ligado a aplicaciones militares, especialmente en misiones de reconocimiento, vigilancia y entrenamiento. Sin embargo, en las últimas dos décadas, los avances en electrónica, sensores, sistemas de control y almacenamiento energético han permitido su rápida expansión hacia aplicaciones civiles y comerciales, convirtiendo a los VANT en una tecnología transversal para múltiples sectores productivos.

Desde una perspectiva funcional, los VANT destacan por su capacidad de acceder a entornos peligrosos o de difícil acceso, reducir la exposición humana al riesgo, disminuir costos operativos y aumentar la eficiencia en la recolección de datos. Estas características han impulsado su adopción en áreas como agricultura de precisión, inspección de infraestructura, cartografía, logística, monitoreo ambiental y seguridad, consolidándolos como herramientas estratégicas en el contexto de la transformación digital y tecnológica.

Evolución histórica de los VANT

La evolución de los VANT se remonta a finales del siglo XVIII y principios del XIX, cuando se desarrollaron los primeros dispositivos aéreos no tripulados con fines militares, como globos aerostáticos utilizados para reconocimiento. Durante la Primera y Segunda Guerra Mundial surgieron los primeros prototipos de aeronaves pilotadas remotamente, empleadas principalmente como blancos aéreos y dispositivos experimentales.

El verdadero punto de inflexión ocurrió durante la Guerra Fría, periodo en el que los avances en telecomunicaciones, sistemas de control y motores permitieron el uso más sistemático de plataformas no tripuladas para vigilancia y reconocimiento. En las décadas posteriores, especialmente a partir de los años noventa, la incorporación del sistema de posicionamiento global (GPS), la miniaturización de componentes electrónicos y el desarrollo de sensores de alta precisión impulsaron el crecimiento exponencial de esta tecnología.

Ya en el siglo XXI, los VANT trascendieron el ámbito militar y se integraron de manera masiva al sector civil. El abaratamiento de los componentes, junto con la aparición de fabricantes comerciales y marcos regulatorios específicos, permitió su utilización en actividades económicas a gran escala. Actualmente, los VANT representan un mercado global en rápida expansión, con una fuerte proyección de crecimiento en aplicaciones comerciales, industriales y de servicios.

Clasificación de los VANT según su uso

Una de las clasificaciones más comunes de los VANT se realiza en función de su uso principal, diferenciando entre drones militares y drones civiles.

Los VANT militares incluyen sistemas de combate aéreo no tripulado (UCAV), plataformas de reconocimiento, vigilancia, guerra electrónica y entrenamiento. Estas aeronaves suelen incorporar tecnologías avanzadas de comunicación segura, sensores de

largo alcance y, en algunos casos, armamento. Su desarrollo está directamente vinculado a estrategias de defensa y seguridad nacional, y su operación se rige por normativas estrictas de carácter militar.

Por otro lado, los VANT civiles abarcan un espectro mucho más amplio de aplicaciones. Dentro de este grupo se encuentran los drones de uso recreativo, los drones de uso profesional y los sistemas orientados a servicios especializados. En el ámbito comercial e industrial, los VANT se utilizan para labores como inspección de redes eléctricas, oleoductos y parques solares, levantamientos topográficos, registro audiovisual, agricultura de precisión y operaciones logísticas, entre otros.

El crecimiento sostenido del mercado civil ha generado una diversificación de plataformas y modelos de negocio, destacándose la tendencia hacia la prestación de servicios basados en drones, más que la simple comercialización de hardware, lo cual representa un elemento clave para el análisis de viabilidad de nuevas tecnologías de propulsión.

Clasificación de los VANT según su configuración aerodinámica

Desde el punto de vista aerodinámico y estructural, los VANT se clasifican principalmente en aeronaves de ala fija, multirrotores y configuraciones híbridas.

Los VANT de ala fija presentan una estructura similar a la de los aviones convencionales, generando sustentación gracias al flujo de aire sobre las alas. Su principal ventaja radica en su alta eficiencia energética, mayor autonomía y capacidad para cubrir largas distancias, lo que los hace adecuados para misiones de vigilancia extensa, cartografía y monitoreo de grandes áreas. No obstante, requieren sistemas de lanzamiento o pistas de despegue, y presentan menores capacidades de maniobra en espacios reducidos.

Los VANT multirrotores utilizan hélices giratorias dispuestas en configuraciones pares (cuadricópteros, hexacópteros, octocópteros), lo que les permite despegar y aterrizar verticalmente, mantenerse en vuelo estacionario y realizar maniobras precisas. Estas características los convierten en la plataforma dominante dentro del mercado civil, especialmente para aplicaciones de inspección, fotografía aérea y agricultura de precisión. Sin embargo, su principal limitación es la baja autonomía, derivada del alto consumo energético necesario para mantener la sustentación.

Las configuraciones híbridas buscan combinar las ventajas de los sistemas de ala fija y multirrotor, integrando capacidades de despegue y aterrizaje vertical (VTOL) con vuelo eficiente en crucero. Estas plataformas representan una solución intermedia con alto potencial para misiones de largo alcance y operaciones logísticas, especialmente cuando se consideran sistemas de propulsión avanzados.

Tabla 1.

Tipos de drones según su configuración

Ala fija	Ala rotatoria	Híbridos

*Nota. Elaboración propia. C*on imágenes obtenidas de bancos de imágenes de libre uso.

Componentes principales de un dron

Marco: Esqueleto del dron, componente en donde se instalan los distintos elementos. Normalmente esta estructura se compone de aleaciones metálicas para evitar un peso elevado o en algunas circunstancias y dependiendo del uso, el marco puede llegar a ser de plástico o fibras de vidrio. Su principal característica es que debe poseer robustez y flexibilidad, puesto que se busca obtener mayor resistencia a los golpes y a la resistencia del viento.

Motores y Hélices: Es el elemento fundamental para mantener el VANT en el aire, es la maquina capaz de transformar la energía eléctrica, energía química (combustibles) en energía mecánica, generando una fuerza que brinda un movimiento.

Radio receptor: Objeto responsable de recibir las señales de radio enviadas por el centro de control, en donde transforma el deseo del usuario en una transmisión de datos, los cuales se envían al controlador de vuelo.

Sistema GPS (Global Position System): Es el encargado de transmitir información de posición al controlador. Su principal atributo es que este sistema debe tener la capacidad de ubicar el dron con un mínimo margen de error.

Controlador de vuelo: Elemento principal, el cual registra toda la información, puesto que los distintos sistemas se conectan en él. Debe disponer la capacidad de realizar y captar tareas en el menor tiempo posible.

Visor de realidad virtual (FPV): Sistema encargado de transmitir y recepcionar el video capturado por la cámara en tiempo real.

Estabilizador de imagen: Dispositivo que reduce y evita vibraciones para la obtención de imagen en tiempo real, un estabilizador debe estar compuesto de acelerómetros, giroscopios para brindar información de movimiento y dirección del VANT.

Cámara: Pieza fundamental para el uso del dron que es capaz de capturar imágenes estáticas o videos en tiempo real, se debe de tener en cuenta la función del dron para poder escoger una cámara correcta según el uso principalmente por factores como el peso, el consumo energético

Clasificación según su método de control

1. Modo manual: En esta modalidad, el piloto remoto actúa sobre la potencia del motor o motores, a través de un emisor a radiocontrol.
2. Modo asistido: Es similar, pero en este caso el piloto no da orden sobre los motores, sino que brinda la intención en el puesto de radiocontrol (subir, bajar, girar, etc.). Durante este actúa un autopiloto que transforma esas intenciones en movimientos en las superficies de control.
3. Modo automático: De forma anticipada el piloto da un plan de vuelo por medio de waypoints. Durante el modo la aeronave cuenta con un autopiloto que ejecuta el plan previsto, realizando de forma autónoma las acciones requeridas en cada momento. De igual forma el control lo mantiene el piloto pudiendo modificar o ejecutar maniobras.

Sistemas de propulsión y fuentes energéticas en VANT

El sistema de propulsión constituye uno de los elementos más críticos en el diseño y desempeño operativo de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), dado que determina directamente parámetros fundamentales como la autonomía, la capacidad de carga útil, el alcance, la eficiencia energética y la viabilidad económica de las misiones. La evolución de los VANT ha estado estrechamente vinculada al desarrollo de sus fuentes energéticas, las cuales han condicionado históricamente sus aplicaciones y limitaciones técnicas.

Desde el punto de vista funcional, los sistemas de propulsión de los VANT pueden clasificarse en propulsión eléctrica basada en baterías, propulsión mediante motores de combustión interna y sistemas híbridos avanzados, dentro de los cuales las pilas de combustible de hidrógeno han cobrado especial relevancia en los últimos años (Depcik et al., 2020; Pan et al., 2019).

Propulsión eléctrica basada en baterías

La forma más extendida de propulsión en VANT civiles es la propulsión eléctrica alimentada por baterías, principalmente de ion-litio (Li-ion) y polímero de litio (Li-Po). Este tipo de sistema se caracteriza por su simplicidad constructiva, bajo mantenimiento, respuesta dinámica inmediata y operación silenciosa, lo que lo hace especialmente atractivo para aplicaciones urbanas, recreativas y profesionales de corto alcance (Yan et al., 2019).

No obstante, las baterías presentan una densidad energética limitada, típicamente en el rango de 130 a 250 Wh/kg, lo cual restringe de manera significativa la autonomía de los VANT, especialmente en configuraciones multirrotor donde se requiere un suministro constante de potencia para mantener la sustentación (Shen et al., 2024). En condiciones reales de operación, muchos drones comerciales presentan autonomías inferiores a 40 minutos, reduciéndose drásticamente cuando se transportan cargas útiles de mayor peso (Depcik et al., 2020).

Adicionalmente, los largos tiempos de recarga, la degradación progresiva de las baterías y la necesidad de reemplazos frecuentes incrementan los costos operativos y limitan la eficiencia en misiones continuas o de largo alcance. Estas limitaciones estructurales han convertido a las baterías en uno de los principales cuellos de botella tecnológicos para la expansión del uso industrial de los VANT (McNabb, 2025).

Propulsión mediante motores de combustión interna

Otra alternativa energética utilizada en determinados VANT, principalmente de ala fija o aplicaciones militares, es la propulsión mediante motores de combustión interna, que emplean combustibles fósiles como gasolina o queroseno. Estos sistemas ofrecen una elevada densidad energética por unidad de masa del combustible, lo que permite autonomías superiores respecto a los sistemas eléctricos convencionales (Depcik et al., 2020).

Sin embargo, los motores de combustión presentan una serie de desventajas importantes en el contexto actual. Entre ellas se destacan las emisiones contaminantes, el alto nivel de vibración y ruido, el mayor mantenimiento mecánico, y la menor precisión en el control del empuje, lo que dificulta su uso en entornos urbanos o misiones que requieren alta estabilidad (Pan et al., 2019).

En el marco de la transición energética y los compromisos internacionales de reducción de emisiones, este tipo de propulsión resulta cada vez menos compatible con los objetivos de sostenibilidad ambiental, especialmente en aplicaciones civiles y comerciales, lo que ha impulsado la búsqueda de alternativas más limpias y eficientes.

Sistemas híbridos de propulsión

Ante las limitaciones de los sistemas puramente eléctricos o de combustión, han surgido los sistemas híbridos de propulsión, los cuales combinan distintas fuentes energéticas para aprovechar las ventajas de cada una. Dentro de esta categoría se incluyen configuraciones como baterías-motor térmico y, de forma más reciente, baterías-pila de combustible de hidrógeno (Erdinc & Uzunoglu, 2010).

Los sistemas híbridos permiten gestionar de manera más eficiente los perfiles de potencia altamente variables presentes en los VANT, especialmente en multirrotores, donde

las fases de despegue y aterrizaje exigen picos elevados de potencia, mientras que el vuelo de crucero puede mantenerse con niveles energéticos más estables (Apeland et al., 2021).

La implementación de estrategias avanzadas de gestión energética en sistemas híbridos ha demostrado mejoras significativas en la autonomía y eficiencia global de los VANT, reduciendo el consumo energético y optimizando el uso de las fuentes disponibles (Boukoberine et al., 2022).

Pilas de combustible de hidrógeno como sistema de propulsión

Las pilas de combustible de hidrógeno representan una de las alternativas más prometedoras para superar las limitaciones energéticas de los VANT convencionales. Estas tecnologías convierten directamente la energía química del hidrógeno en energía eléctrica mediante un proceso electroquímico, produciendo como único subproducto vapor de agua (Gutiérrez Jodra, 2005).

Desde el punto de vista energético, los sistemas basados en pilas de combustible presentan densidades energéticas significativamente superiores a las de las baterías de ion-litio, alcanzando valores efectivos entre 250 y 540 Wh/kg para sistemas híbridos, lo que puede duplicar o incluso cuadruplicar el tiempo de vuelo de un VANT de similar peso (Shen et al., 2024).

Las pilas de combustible más utilizadas en aplicaciones aeroespaciales ligeras son las de membrana de intercambio protónico (PEMFC), debido a su baja temperatura de operación, rápido arranque, modularidad y elevada relación potencia-peso (Sharaf & Orhan, 2014). Diversos estudios y demostraciones industriales han evidenciado vuelos continuos superiores a dos, cuatro e incluso doce horas en drones multirrotor propulsados por hidrógeno, frente a autonomías típicas inferiores a una hora en drones eléctricos convencionales (Doosan Mobility Innovation, 2023; Intelligent Energy, 2024).

Además, el reabastecimiento de hidrógeno es considerablemente más rápido que la recarga de baterías, lo que mejora la disponibilidad operativa y reduce los tiempos muertos entre misiones, un factor clave en aplicaciones industriales y logísticas (McNabb, 2025).

El hidrógeno como vector energético en la aviación

El hidrógeno ha adquirido un papel central dentro de las estrategias de transición energética global, particularmente en sectores de difícil descarbonización como el transporte y la aviación. A diferencia de los combustibles fósiles, el hidrógeno no es una fuente primaria de energía, sino un vector energético, es decir, un medio para almacenar, transportar y convertir energía proveniente de otras fuentes (Gutiérrez Jodra, 2005).

En el ámbito aeronáutico, el uso del hidrógeno representa una alternativa estratégica para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la eficiencia energética y avanzar hacia modelos de movilidad aérea más sostenibles, en línea con los compromisos internacionales de mitigación del cambio climático y los objetivos de desarrollo sostenible.

Concepto de hidrógeno como vector energético

El hidrógeno es el elemento químico más abundante en el universo, aunque en la Tierra se encuentra mayoritariamente combinado con otros elementos, como el oxígeno en el agua o el carbono en los hidrocarburos. Debido a ello, su obtención requiere un proceso previo que consume energía, lo que refuerza su carácter de vector energético y no de energía primaria (Gutiérrez Jodra, 2005).

Una de las principales ventajas del hidrógeno radica en su alta energía específica por unidad de masa, aproximadamente 120 MJ/kg, valor significativamente superior al del gas natural o los derivados del petróleo. No obstante, su baja densidad volumétrica presenta importantes desafíos en materia de almacenamiento y transporte, especialmente en aplicaciones móviles como los VANT (Aziz, 2021).

Desde el punto de vista ambiental, el hidrógeno destaca por producir únicamente agua como subproducto cuando es utilizado en pilas de combustible, convirtiéndose en una opción altamente atractiva para reducir las emisiones locales y globales del sector aeronáutico (Sharaf & Orhan, 2014).

Producción de hidrógeno y su relevancia en la aviación

La producción de hidrógeno puede realizarse mediante diversos métodos, entre los que destacan el reformado de hidrocarburos, la gasificación del carbón y la electrólisis del agua. Actualmente, la mayor parte del hidrógeno producido a nivel mundial proviene de combustibles fósiles, proceso que genera emisiones significativas de CO_2. Sin embargo, el interés creciente se centra en el denominado hidrógeno verde, obtenido mediante electrólisis alimentada con fuentes renovables (UPME, 2024).

En el contexto aeronáutico y de los VANT, la producción descentralizada de hidrógeno mediante energías renovables ofrece ventajas significativas, especialmente para operaciones en zonas remotas o de difícil acceso. La combinación de hidrógeno verde y pilas de combustible permite configurar ciclos energéticos prácticamente libres de emisiones, donde el único subproducto liberado es vapor de agua (Ariza & Molano, 2023).

Esta característica resulta especialmente relevante para la aviación no tripulada, donde la sostenibilidad ambiental, el bajo impacto acústico y la reducción de la huella de carbono son factores cada vez más valorados en aplicaciones civiles, urbanas e industriales.

Almacenamiento de hidrógeno en aplicaciones aeronáuticas

El almacenamiento del hidrógeno constituye uno de los principales retos técnicos para su implementación en plataformas aéreas. En términos generales, se distinguen tres grandes métodos de almacenamiento: hidrógeno comprimido, hidrógeno líquido y almacenamiento en estado sólido (Aziz, 2021).

El almacenamiento de hidrógeno comprimido, especialmente mediante cilindros tipo IV, es actualmente el método más utilizado en drones comerciales a hidrógeno, debido a su madurez tecnológica y relativa simplicidad. No obstante, requiere presiones elevadas (350–700 bar), lo que implica consideraciones relevantes en materia de seguridad, peso y diseño estructural (Shen et al., 2024).

El hidrógeno líquido ofrece una densidad energética volumétrica superior, pero requiere temperaturas criogénicas cercanas a −253 °C, lo que incrementa la complejidad del sistema, los costos y las pérdidas energéticas por licuefacción. A pesar de ello, se han demostrado sistemas experimentales capaces de multiplicar la autonomía de drones multirrotor mediante este método (Stroman et al., 2014).

Más recientemente, el almacenamiento en estado sólido, basado en materiales reticulares o hidruros, ha surgido como una alternativa prometedora. Estos sistemas permiten almacenar hidrógeno a bajas presiones y temperaturas cercanas a condiciones ambientales, mejorando la seguridad y la integración aerodinámica, aunque su aplicación comercial aún se encuentra en etapas de desarrollo (McNabb, 2025).

Seguridad y manejo del hidrógeno en entornos aeronáuticos

La seguridad del hidrógeno ha sido históricamente uno de los principales factores de resistencia para su adopción a gran escala. Sin embargo, numerosos estudios han demostrado que, cuando se gestiona adecuadamente, el hidrógeno no presenta mayores riesgos que otros combustibles convencionales (Gutiérrez Jodra, 2005).

En aplicaciones aeronáuticas, las características físicas del hidrógeno, como su alta difusividad y baja densidad, hacen que las fugas se disipen rápidamente en espacios abiertos, reduciendo la probabilidad de acumulaciones peligrosas. Además, el desarrollo de materiales compuestos avanzados y sistemas de detección temprana ha permitido mejorar significativamente los niveles de seguridad en sistemas de almacenamiento y distribución (Aziz, 2021).

Para los VANT, la implementación de cilindros certificados, reguladores de presión livianos y procedimientos de emergencia bien definidos constituye un aspecto clave para garantizar operaciones fiables y seguras, tanto en aplicaciones civiles como industriales.

El hidrógeno en la transición energética del sector aeronáutico

El sector aeronáutico es uno de los mayores contribuyentes a las emisiones globales de CO_2, lo que ha impulsado la búsqueda de soluciones energéticas alternativas. En este contexto, el hidrógeno ha sido identificado como uno de los vectores energéticos con mayor potencial para transformar la aviación en el mediano y largo plazo (Ariza & Molano, 2023).

A nivel internacional, proyectos liderados por fabricantes aeronáuticos, universidades y consorcios tecnológicos han demostrado la viabilidad de integrar pilas de combustible de hidrógeno en aeronaves tripuladas y no tripuladas, incluyendo configuraciones VTOL orientadas a la movilidad aérea urbana (Universidad de Sevilla, 2025).

En Colombia, el marco normativo establecido por la Ley 2099 de 2021 y el Decreto 1476 de 2022, junto con el Plan Energético Nacional 2024–2054, reconoce al hidrógeno como un pilar estratégico para la transición energética, abriendo oportunidades para su aplicación en sectores como la aviación y los VANT, tanto desde la investigación académica como desde la implementación tecnológica (UPME, 2024).

Pilas de combustible de hidrógeno: fundamentos y aplicación en VANT

Las pilas de combustible constituyen una tecnología electroquímica capaz de convertir directamente la energía química de un combustible en energía eléctrica, sin recurrir a procesos de combustión. En el caso del hidrógeno, este proceso se realiza mediante una reacción controlada con oxígeno, produciendo electricidad, calor y agua como subproducto. Debido a su elevada eficiencia y bajas emisiones, las pilas de combustible han sido ampliamente reconocidas como una solución clave dentro de los sistemas energéticos

sostenibles, especialmente en aplicaciones de movilidad (Gutiérrez Jodra, 2005; Sharaf & Orhan, 2014).

En el contexto de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT), las pilas de combustible de hidrógeno han demostrado un alto potencial para superar las limitaciones energéticas de los sistemas basados exclusivamente en baterías, particularmente en misiones que requieren alta autonomía, mayor alcance y operación continuada.

Principio de funcionamiento de las pilas de combustible de hidrógeno

Una pila de combustible de hidrógeno opera a partir de un proceso electroquímico en el que el hidrógeno suministrado al ánodo se disocia en protones y electrones. Los protones atraviesan un electrolito, mientras que los electrones circulan a través de un circuito externo, generando corriente eléctrica. En el cátodo, los protones y los electrones reaccionan con el oxígeno del aire para formar agua (O'Hayre et al., 2009).

Este mecanismo presenta una ventaja fundamental frente a los sistemas térmicos: la conversión directa de energía química en energía eléctrica permite alcanzar rendimientos significativamente superiores, reduciendo las pérdidas asociadas a los ciclos termodinámicos tradicionales (Gutiérrez Jodra, 2005). En condiciones ideales, el rendimiento teórico puede aproximarse al 95 %, mientras que los sistemas reales de pilas de combustible alcanzan eficiencias del orden del 60-70 % (Sharaf & Orhan, 2014).

Tipos de pilas de combustible y su clasificación

Existen diversos tipos de pilas de combustible, clasificados principalmente en función del electrolito utilizado y de la temperatura de operación. Entre las más relevantes se encuentran las pilas alcalinas, de ácido fosfórico, de carbonato fundido, de óxido sólido y las pilas de membrana de intercambio protónico (PEMFC) (Gutiérrez Jodra, 2005).

Las PEMFC son las más adecuadas para aplicaciones aeronáuticas ligeras y VANT debido a una combinación de características técnicas favorables: baja temperatura de

operación (60–80 °C), alta densidad de potencia, rápido arranque, modularidad y buena respuesta a variaciones de carga (Sharaf & Orhan, 2014; Shen et al., 2024).

Otras tecnologías, como las pilas de óxido sólido, si bien presentan altas eficiencias, operan a temperaturas muy elevadas, lo que las hace poco viables para plataformas aéreas de pequeño y mediano tamaño por limitaciones de peso, control térmico y tiempos de arranque.

Arquitectura típica de una PEMFC para VANT

Una pila de combustible de membrana de intercambio protónico está compuesta por varios elementos clave: placas bipolares, capas de difusión de gas (GDL), capas catalíticas y una membrana polimérica conductora de protones, comúnmente de tipo Nafion (O'Hayre et al., 2009).

En aplicaciones para VANT, estas celdas se agrupan en stacks o apilamientos para alcanzar los niveles de potencia requeridos. La configuración debe optimizarse cuidadosamente para reducir peso, volumen y pérdidas eléctricas, sin comprometer la seguridad ni la durabilidad del sistema (Shen et al., 2024).

Adicionalmente, los sistemas PEMFC para drones suelen integrarse en arquitecturas híbridas, combinadas con baterías de ion-litio. Esta configuración permite cubrir los picos de potencia requeridos durante el despegue y las maniobras, mientras que la pila de combustible suministra la potencia base durante el vuelo en crucero, maximizando así la eficiencia y la autonomía global (Boukoberine et al., 2022).

Aplicaciones de pilas de combustible en VANT

Las aplicaciones de VANT propulsados por pilas de combustible se han expandido rápidamente en los últimos años. Destacan especialmente las misiones de vigilancia y reconocimiento de largo alcance, inspección de infraestructuras energéticas, agricultura de

precisión en grandes extensiones, logística de suministros médicos y operaciones de búsqueda y rescate (Shen et al., 2024).

Casos industriales como los desarrollados por Doosan Mobility Innovation e Intelligent Energy han validado el uso comercial de estas plataformas, demostrando que los sistemas PEMFC no solo son técnicamente viables, sino también competitivos en términos operativos y ambientales (Doosan Mobility Innovation, 2023; Intelligent Energy, 2024).

Drones impulsados por hidrógeno - Casos de estudio

El desarrollo de drones impulsados por hidrógeno ha pasado, en la última década, de un enfoque predominantemente experimental a la consolidación de plataformas operativas en entornos reales, especialmente en aplicaciones que demandan gran autonomía, carga útil moderada y alta disponibilidad operativa. Este avance ha sido posible gracias a la madurez creciente de las pilas de combustible de membrana de intercambio protónico (PEMFC), los progresos en almacenamiento de hidrógeno y la integración de estrategias avanzadas de gestión energética (Shen et al., 2024).

Actualmente, los drones a hidrógeno representan una alternativa tecnológica viable frente a los sistemas eléctricos convencionales, al ofrecer tiempos de vuelo muy superiores, menor degradación del sistema energético y un impacto ambiental reducido, factores clave para su adopción en aplicaciones comerciales e industriales.

Evolución del estado del arte en drones a hidrógeno

Las primeras demostraciones de drones multirrotor propulsados por pilas de combustible se realizaron a mediados de la década de 2010, cuando empresas y centros de investigación comenzaron a integrar sistemas PEMFC en plataformas comerciales existentes. Estas primeras configuraciones lograron duplicar e incluso triplicar los tiempos

de vuelo respecto a drones alimentados exclusivamente por baterías de ion-litio (Fuel Cells Bulletin, 2015; Shen et al., 2024).

Con el paso del tiempo, la investigación se ha orientado hacia la optimización del peso, el modularidad de los sistemas de potencia y el desarrollo de arquitecturas híbridas, en las que las baterías apoyan a la pila de combustible durante fases de alta demanda energética como el despegue y el aterrizaje. Este enfoque ha permitido ampliar el rango de misiones y mejorar la confiabilidad operativa de las plataformas (Boukoberine et al., 2022).

Aplicaciones comerciales y operativas emergentes

El análisis del estado del arte muestra que los drones impulsados por hidrógeno presentan ventajas particularmente relevantes en aplicaciones como:

- Vigilancia y reconocimiento de largo alcance, donde la continuidad del vuelo es crítica.
- Inspección de infraestructuras energéticas y líneas de transmisión en zonas extensas o remotas.
- Agricultura de precisión a gran escala, reduciendo interrupciones por recarga.
- Logística y transporte de suministros de emergencia, especialmente en escenarios de desastre.
- Movilidad aérea urbana experimental, integrándose con sistemas de gestión del espacio aéreo.

Estas aplicaciones coinciden con las tendencias de mercado observadas a nivel global y regional, donde se proyecta un crecimiento sostenido del sector de drones comerciales y de analítica asociada (Data Bridge Market Research, 2023; UAV Latam, 2024).

Desafíos actuales y tendencias futuras

Pese a los avances evidentes, los drones impulsados por hidrógeno aún enfrentan desafíos relacionados con el costo inicial, la infraestructura de suministro de hidrógeno y la estandarización normativa. No obstante, el desarrollo de tecnologías emergentes como el almacenamiento sólido de hidrógeno y la reducción progresiva de costos de las pilas PEMFC indican una tendencia clara hacia la maduración y adopción comercial de estas plataformas (McNabb, 2025; Shen et al., 2024).

En este sentido, los drones a hidrógeno se perfilan como un componente estratégico dentro del ecosistema de movilidad aérea sostenible, especialmente en escenarios donde las limitaciones energéticas de las baterías convencionales resultan críticas.

Marco normativo y estratégico del hidrógeno y los VANT: enfoque en Colombia

La adopción de nuevas tecnologías energéticas en el ámbito aeronáutico no solo depende de su viabilidad técnica y económica, sino también del marco normativo y estratégico que regula su desarrollo, implementación y operación. En el caso de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) impulsados por hidrógeno, el contexto legislativo y de planificación energética adquiere un papel fundamental para garantizar condiciones adecuadas de investigación, inversión e integración en el sistema productivo nacional.

Colombia, en los últimos años, ha avanzado de manera significativa en la formulación de políticas públicas orientadas a la transición energética, reconociendo al hidrógeno como un vector energético clave para la descarbonización de sectores estratégicos, entre ellos el transporte y la aviación.

Marco legal de la transición energética en Colombia

Un hito fundamental en la política energética colombiana es la Ley 2099 de 2021, la cual establece disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético y la promoción de fuentes no convencionales de energía. Esta ley modifica y

fortalece el marco creado previamente por la Ley 1715 de 2014, ampliando los incentivos para la investigación, el desarrollo y la adopción de tecnologías limpias (Congreso de la República de Colombia, 2021).

La Ley 2099 de 2021 reconoce explícitamente la necesidad de diversificar la matriz energética nacional, reducir la dependencia de los combustibles fósiles y fomentar la innovación tecnológica como mecanismo para alcanzar los compromisos ambientales internacionales asumidos por el país. En este contexto, el hidrógeno se posiciona como una alternativa estratégica, particularmente cuando es producido a partir de fuentes renovables.

De manera complementaria, el Decreto 1476 de 2022 establece lineamientos específicos para promover la innovación, investigación, producción, almacenamiento, transporte y uso del hidrógeno como fuente energética. Este decreto sienta las bases para el desarrollo de una economía del hidrógeno en Colombia, incentivando la participación de entidades académicas, empresas y organismos del Estado en proyectos de investigación aplicada (Presidencia de la República de Colombia, 2022).

El hidrógeno en el Plan Energético Nacional 2024–2054

El Plan Energético Nacional (PEN) 2024–2054, elaborado por la Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME), constituye el principal instrumento de planificación energética de largo plazo del país. En este documento, el hidrógeno es identificado como un vector energético habilitador para la descarbonización progresiva de sectores como el transporte terrestre, marítimo y aéreo (UPME, 2024).

El PEN plantea escenarios prospectivos en los que el hidrógeno verde adquiere un rol creciente, apoyado en la expansión de las energías renovables y en la reducción de los costos tecnológicos asociados a la electrólisis y las pilas de combustible. Asimismo, se reconoce el potencial del hidrógeno para aplicaciones descentralizadas y móviles, lo que resulta especialmente relevante para plataformas como los VANT.

Desde una perspectiva estratégica, el PEN enfatiza la necesidad de articular la política energética con la política industrial y tecnológica, promoviendo proyectos piloto, demostradores tecnológicos y alianzas entre academia e industria. Este enfoque crea un entorno favorable para el desarrollo progresivo de drones impulsados por hidrógeno en el país.

Marco aeronáutico y VANT en Colombia

El uso de VANT en Colombia se encuentra regulado principalmente por la Aerocivil, entidad encargada de establecer las normas técnicas y operativas para la aviación civil. Aunque la regulación vigente se centra en aspectos de seguridad operacional, espacio aéreo y certificación, el crecimiento del uso de drones para aplicaciones civiles ha motivado una actualización continua del marco regulatorio.

Si bien aún no existen normas específicas para VANT impulsados por hidrógeno, los principios generales de aeronavegabilidad, seguridad y gestión del riesgo son plenamente aplicables a estas plataformas. En este sentido, la incorporación de sistemas energéticos alternativos deberá ajustarse a los criterios técnicos definidos por la autoridad aeronáutica, especialmente en lo relativo a almacenamiento de energía, manejo de materiales peligrosos y procedimientos de emergencia.

El avance de proyectos académicos y experimentales, como los desarrollados en la Fuerza Aeroespacial Colombiana y en instituciones de formación técnica y universitaria, constituye un primer paso hacia la validación nacional de estas tecnologías dentro del marco regulatorio existente (Ariza & Molano, 2023).

Rol de la academia y las instituciones públicas

La política energética colombiana reconoce explícitamente la academia como un actor clave en el proceso de transición energética. Tanto la Ley 2099 de 2021 como el

Decreto 1476 de 2022 destacan la importancia de fortalecer la investigación, el desarrollo experimental y la formación de talento humano en tecnologías limpias.

En este contexto, instituciones como la Escuela de Suboficiales de la Fuerza Aeroespacial Colombiana (ESUFA) han promovido proyectos de investigación exploratoria orientados a la generación y uso del hidrógeno como combustible, integrando conceptos de sostenibilidad, innovación y aplicación aeronáutica. Este tipo de iniciativas contribuyen no solo al avance tecnológico, sino también a la apropiación social del conocimiento y al fortalecimiento de capacidades nacionales (Ariza & Molano, 2023).

La articulación entre universidades, centros de investigación, fuerzas armadas y sector productivo resulta fundamental para reducir la brecha entre la investigación académica y la implementación industrial de drones a hidrógeno.

Implicaciones para el desarrollo de VANT a hidrógeno en Colombia

El marco normativo y estratégico vigente en Colombia crea condiciones favorables para el desarrollo de VANT impulsados por hidrógeno, especialmente en aplicaciones de largo alcance, monitoreo ambiental, logística y seguridad. La convergencia entre políticas de transición energética, planificación de largo plazo y desarrollo tecnológico abre oportunidades para la implementación gradual de estas plataformas.

No obstante, persisten desafíos relacionados con la infraestructura de producción y suministro de hidrógeno, los costos iniciales y la adaptación de la regulación aeronáutica a nuevas tecnologías energéticas. Superar estos desafíos requerirá una coordinación efectiva entre entidades regulatorias, instituciones académicas y actores industriales.

En este escenario, los VANT a hidrógeno pueden convertirse en laboratorios tecnológicos naturales, capaces de validar soluciones energéticas limpias en condiciones reales de operación, aportando evidencia técnica que respalde futuras decisiones regulatorias y de inversión.

4. Estado del Arte

Revisión sistemática PRISMA

Para el estado del arte de este trabajo investigativo se utilizó la metodología PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematics Reviews and Meta-Analysis) del 2020 para revisiones sistemáticas. (Page et al., 2021) La base de datos utilizada fue Scopus dado que se considera una fuente sólida especialmente en áreas de ingeniería y tecnología como nuestra investigación; combina ingeniería, ciencias básicas y ciencias sociales; posee una de las coberturas más amplias de literatura revisada por pares; incluye artículos actualizados de revistas de editoriales líderes como Elsevier, Springer, Wiley e IEEE; y finalmente, porque gracias a la Universidad EAN se cuenta con pleno acceso a los recursos de esta plataforma.

Identificación

Para iniciar con paso 1 de identificación, se buscaron artículos con el título “Drones de hidrógeno” o “Drones” and “Hidrógeno” con lo cual no apareció ningún resultado. Así, se procedió a buscar el título en inglés “Hydrogen Drones” lo cual arrojó 19 resultados. De estos resultados 2 son del año 2018 sobre drones pequeños propulsados por celdas de hidrógeno; 3 son del año 2021; 2 del año 2022; solo un artículo publicado en 2023; 3 artículos publicados en 2024; 5 artículos del año 2025 y solo 3 publicados en el 2026 hasta este momento. Se utilizo también el operador AND con “Hydrogen” y “Drone” en singular, pero aparecen los mismos 19 resultados. Luego se incluyeron los términos “fuel cell” ya que el hidrógeno puede funcionar como energía si se quema y hay combustión como un gas normal, pero la tecnología que nos interesa es la de las celdas de hidrógeno (fuel cells).

Al realizar la búsqueda de artículos con el título “Drones” and “Hydrogen” and “Fuel Cells”, se obtuvieron 11 resultados.

Otro término utilizado para los drones es VANT (Vehículo Aéreo No Tripulado) que en inglés es UAV (Unmanned Aerial Vehicle), por lo cual se realizó la búsqueda de título de

artículos con las palabras “Hydrogen UAV”, búsqueda que arrojó 54 resultados, siendo el artículo más antiguo del año 2002. A esta búsqueda, cómo a la anterior, se le agregaron los términos “fuel cell”, acortando los resultados a 24 artículos. Es decir, un resultado de 35 artículos en la fase de identificación solo con el título del artículo.

Se establecieron los criterios de inclusión y exclusión para los artículos encontrados. Los criterios de inclusión fueron: artículos sobre autonomía de vuelo, eficiencia energética y comparaciones con drones convencionales, que hayan sido publicados en los últimos 10 años, que tengan datos experimentales, simulaciones o análisis técnicos.

Por otro lado, los criterios de exclusión fueron: artículos que hablen solo de drones sin incluir el hidrógeno, comparación entre baterias convencionales y celdas de hidrógeno pero que no sean probadas específicamente en drones, los más antiguos del 2015.

Con la exclusión de tiempo y las palabras “hydrogen fuel cell uav” quedaron 21 artículos. Mientras que con las palabras “hydrogen fuel cell drones” quedaron los mismos 11 artículos para un total de 32 artículos como resultado de la fase de cribado.

Cribado

En esta tabla se muestran los 11 artículos que tienen en su título “Hydrogen fuel cell drones” con la justificación sobre la selección de los elegidos y los excluidos. El proceso arrojó 4 artículos excluidos y 7 incluidos.

Tabla 2.

Justificación de inclusión y exclusión de los distintos artículos

#	Año	Titulo	Decisión	Justificación
1	2026	Battery drones versus hydrogen fuel cell drones for last-mile delivery	Incluir	Comparación entre drones de batería e Hidrogeno mediante simulación para mensajería.
2	2026	Drone endurance in hydrogen fuel cell hybrid	Incluir	Analiza sistemas híbridos en VANT. evaluando autonomía,

		technologies: Power architectures and design strategies		eficiencia y estrategias de diseño energético
3	2025	Improved sliding mode temperature control of hydrogen fuel cells for multirotor drones	Excluir	El enfoque es más detallado al control térmico interno de los VANT.
4	2024	A Review on Key Technologies and Developments of Hydrogen Fuel Cell Multi-Rotor Drones	Incluir	Proporciona una visión general. Analizando los desafíos y tecnologías de drones con celdas de hidrógeno.
5	2024	Time-dependent hydrogen fuel cell vehicle routing problem with drones and variable drone speeds	Excluir	se centra en la ejecución de un algoritmo para optimizar costos y tiempos de operación
6	2022	Development of a Liquid Hydrogen-Based Fuel Cell System for the HYDRA-2 Drone	Incluir	Diseña un sistema de almacenamiento y propulsión en un dron. (caso experimental HYDRA-2)
7	2021	Lightweight hydrogen storage cylinder for fuel cell propulsion systems to be applied in drones	Incluir	Provee información sobre el almacenamiento de Hidrogeno para drones en cilindros con un enfoque experimental.
8	2021	Review of latest developments in pem fuel cell research with	Incluir	Evalúa la eficiencia de celdas de hidrógeno frente a baterías en drones, aportando información clave para determinar condiciones

		application to hydrogen powered drones		de operación y viabilidad en aplicaciones reales.
9	2021	Hybrid fuel cell powered drones energy management strategy improvement and hydrogen saving using real flight test data	Incluir	Usa estrategias de eficiencia para un dron hibrido con celdas de Hidrogeno y utiliza un método experimental con datos reales de vuelo
10	2018	Compressed hydrogen storage in contemporary fuel cell propulsion systems of small drones	Excluir	Se excluye por presentar sobre almacenamiento de hidrógeno en drones, sin aportar información adicional o relevante frente a estudios más recientes.
11	2018	Liquefied and chemical hydrogen storage in contemporary small drones' fuel cell propulsion systems	Excluir	Se excluye por redundancia temática con otros estudios del mismo autor y por no aportar información adicional.

Nota. Elaboración Propia

A continuación, se muestra la segunda tabla con los 21 artículos preseleccionados con las palabras “hydrogen fuel cell uav”.

Tabla 3.

Justificación de inclusión y exclusión de los distintos artículos

#	Año	Titulo	Decisión	Justificación
1	2026	Multidisciplinary design optimization for hydrogen fuel cell-battery hybrid systems: Integrating	Excluido	Se centran demasiado en el diseño aerodinámico, optimización de la estructura del ala o geometría del dron. El estudio analiza la relación entre la pila de combustible de

		hybridization degree into UAV conceptual design		hidrógeno y la batería. Menciona resultados cuantificables en porcentaje de eficiencia y aumento de autonomía de vuelo.
2	2025	Simulation research on thermal management system of fuel cell for liquid hydrogen powered UAV	Excluido	Se centra en el diseño aerodinámico, optimización de la estructura del ala o geometría del dron. Este artículo habla de hidrógeno líquido el cual proporciona una mayor durabilidad del vuelo. Además, habla de cómo el hidrógeno frío aporta al mantenimiento de la temperatura de la batería del dron.
3	2025	Novel custom-made design and analysis of hydrogen PEM fuel cell for high endurance small UAV applications	Excluir	Se centra en drones pequeños de 4 kg no aptos para los sectores industriales que se buscan en este trabajo.
4	2025	Enhancing Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Endurance with Hybrid Hydrogen Fuel Cells and Lithium Batteries for Extended Flight Time	Incluir	Menciona el análisis financiero de costo-beneficio. Menciona Inversión inicial y la vida útil de esta tecnología.

5	2024	POWER SYSTEM ANALYSIS OF SOLAR AND HYDROGEN FUEL CELL POWERED EVTOL UAV	Incluir (Prioridad alta)	Habla sobre la tecnología de los drones eVTOL, que despegan como un helicóptero y vuelan como un avión. Los drones que queremos importar utilizan esta tecnología. Toca el tema de ciclos de despegue y aterrizaje como también el tamaño de los tanques de hidrógeno. Combina paneles solares, hidrógeno y baterías.
6	2024	Simulation Research on Thermal Management of Hydrogen Fuel Cell for UAV	Incluir	Comparación de sistemas de enfriamiento en drones con celdas de hidrógeno y consideraciones en el cambio de diseño del chasis de los drones para mejorar espacio para sensores.
7	2024	Testing and Integration of a Hydrogen Fuel Cell in a Hybrid-Electric Propulsion Rig for UAV	Excluir	El resumen tiene información limitada. No presenta datos cuantitativos.
8	2023	Modeling of Fuel Cell Operating Time and Hydrogen Storage Weight Prediction for Multi-Rotor UAV Design Optimization	Excluido	Se centra demasiado en el diseño aerodinámico, optimización de la estructura del ala o geometría del dron. Utiliza una metodología con un margen de error bajo para predecir la durabilidad del vuelo del dron. Utiliza los drones multi-rotor.

9	2023	Design and Construction of a UAV for High Atmosphere Flight Powered by Hydrogen Fuel Cell	Incluir	Aborda el uso de drones de hidrógeno en condiciones operativas extremas y misiones de alta precisión.
10	2023	A Novel Energy Management Strategy Considering Internal Loss and Hydrogen Consumption for Fuel Cell UAV	Incluir	Habla de un enfoque de control avanzado. La gestión de la energía es lo que evita que los componentes se degraden prematuramente.
11	2023	Modeling and Numerical investigation of thermal management using wing fence, Hydrogen Fuel Cell UAV test case	Incluir	Innovación en el diseño aerodinámico-térmico.
12	2023	EVTOL UAV CONVERSION TO HYDROGEN FUEL-CELL POWER SOURCE FOR ENHANCED ENDURANCE	Incluir	Muestra resultados de mejora de la autonomía de vuelo de casi un 300%. Pasa de 90 minutos a 272 minutos de vuelo.

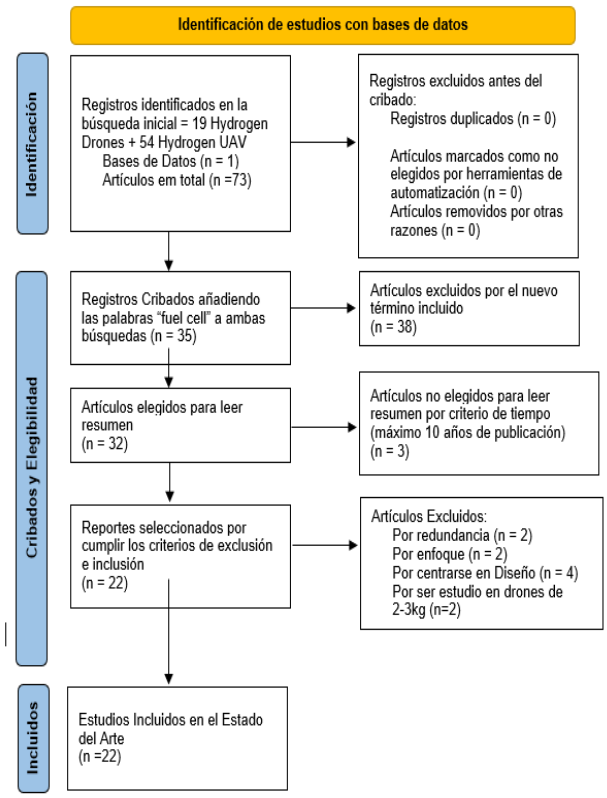
13	2023	Benchmarking environmental impacts of power groups used in a designed UAV: Hybrid hydrogen fuel cell system versus lithium-polymer battery drive system	Incluir	Se enfoca en la sostenibilidad ambiental. Datos comparativos reales sobre el calentamiento global.
14	2022	Advanced Sizing Methodology for a Multi-Mode eVTOL UAV Powered by a Hydrogen Fuel Cell and Battery	Incluir	Tiene el algoritmo para calcular el dimensionamiento. Su enfoque son drones de 23kg
15	2022	Design of a tactical eVTOL UAV with a Hydrogen Fuel Cell	Incluir	Se ajusta al estar en el rango de los 20-25 kg, los datos de fatiga estructural y aerodinámica son aplicables nuestro tipo de drones
16	2022	Multidisciplinary Optimisation of an eVTOL UAV With a Hydrogen Fuel Cell	Incluir	Habla del mejoramiento del rendimiento utilizando optimización multidisciplinaria.
17	2022	Enhanced performance prediction of hydrogen fuel cell powered evtol uav	Incluir	Utiliza datos experimentales para corrección de los resultados teóricos del vuelo del dron.

18	2020	Evaluation of design methodology, limitations, and iterations of a hydrogen fuelled hybrid fuel cell mini UAV	Incluir	Proporciona un marco sólido sobre la transición energética en la aviación.
19	2020	Design and Testing of a Vertical Take-Off and Landing UAV Optimized for Carrying a Hydrogen Fuel Cell with a Pressure Tank	Incluir	Justifica que la tecnología de hidrógeno puede ser funcionalmente más segura que los drones convencionales al permitir arquitecturas con alta redundancia que protegen sensores costosos.
20	2017	Design and bench test of a fuel-cell/battery hybrid UAV propulsion system using metal hydride hydrogen storage	Incluir	Habla de la lógistica para recargar los drones. Propone usar hidruros metálicos en lugar de gas comprimido. Capex – Opex y punto de equilibrio.
21	2016	Analysis of a hydrogen fuel cell-PV power system for small UAV	Excluir	Combina hidrógeno con paneles solares y se sale del area de estudio. Pasar de 470 min a 970 min (más de 16 horas de vuelo)

Nota. Elaboración Propia.

Figura 1.

Diagrama de flujo metodología PRISMA



Nota. Elaboración Propia

Fuentes secundarias

Casos de estudio industriales relevantes

- Doosan Mobility Innovation (Corea del Sur)

Uno de los casos más destacados en el ámbito industrial es el de Doosan Mobility Innovation (DMI), cuyos drones multirrotor DS30 incorporan pilas de combustible de hidrógeno de hasta 2,6 kW. Estas plataformas han demostrado autonomías cercanas a las dos horas, incluso transportando cargas útiles significativas, superando hasta cuatro veces el tiempo de vuelo de drones eléctricos convencionales (Doosan Mobility Innovation, 2023).

Los drones de DMI han sido empleados en misiones reales de entrega de suministros médicos, inspección de plantas solares y operaciones de emergencia en ubicaciones de difícil acceso, validando la fiabilidad de este tipo de sistemas bajo condiciones operativas exigentes.

- Intelligent Energy (Reino Unido)

Intelligent Energy ha desarrollado la serie de módulos IE-SOAR, diseñados específicamente para aplicaciones en UAV. Estos sistemas PEMFC, altamente compactos y modulares, han sido integrados en diferentes plataformas de ala fija, multirrotor y VTOL, permitiendo vuelos continuos de varias horas sin comprometer la estabilidad ni la seguridad del sistema (Intelligent Energy, 2024).

Un elemento clave del éxito de esta tecnología es su integración con baterías auxiliares, lo que garantiza una respuesta rápida a picos de potencia y aporta redundancia al sistema energético, aspecto fundamental para aplicaciones BVLOS (Beyond Visual Line of Sight).

Casos de estudio en Asia y China

China se ha posicionado como uno de los principales productores y consumidores de drones a hidrógeno. Diversas empresas han logrado establecer récords de autonomía utilizando almacenamiento de hidrógeno comprimido, con tiempos de vuelo superiores a tres y cuatro horas en drones multirrotor (Shen et al., 2024).

Además, el establecimiento de normativas específicas para sistemas de pila de combustible en UAV refleja un elevado nivel de madurez tecnológica y un interés estratégico por parte del Estado en esta solución energética.

Investigación académica y desarrollos en Europa

En el ámbito académico europeo, destaca el trabajo desarrollado por la Universidad de Sevilla, en colaboración con empresas tecnológicas y centros de investigación, donde se logró integrar una pila de combustible de hidrógeno verde en un dron VTOL híbrido. Los resultados mostraron un incremento aproximado del 50 % en el alcance del dron frente a configuraciones eléctricas convencionales, utilizando hidrógeno producido mediante electrólisis alimentada con energía solar (Universidad de Sevilla, 2025).

Este desarrollo se enmarca en proyectos europeos de gestión del tráfico aéreo no tripulado (U-Space), lo que evidencia el potencial de los drones a hidrógeno para la movilidad aérea urbana sin emisiones.

Debido al carácter analítico y prospectivo del estudio, la investigación se apoya fundamentalmente en fuentes secundarias, seleccionadas con criterios de pertinencia, actualidad y confiabilidad. Estas incluyen:

- Artículos científicos indexados (Energies, International Journal of Hydrogen Energy, IEEE).
- Informes técnicos de empresas líderes (Doosan Mobility Innovation, Intelligent Energy).

- Estudios de mercado especializados (Data Bridge Market Research, UAV Latam, Spherical Insights).
- Documentos normativos y de planificación nacional (Ley 2099 de 2021, Decreto 1476 de 2022, Plan Energético Nacional 2024–2054).
- Tesis y trabajos académicos de referencia en el ámbito del diseño y costos de drones a hidrógeno.

5. Metodología de análisis y evaluación de viabilidad

Enfoque metodológico de la investigación

La investigación provee un enfoque mixto, combinando técnicas cualitativas y cuantitativas con el objetivo de evaluar la viabilidad de los drones impulsados por celdas de combustible de Hidrogeno en el mercado colombiano. El estudio es una investigación aplicada, orientada en analizar soluciones tecnológicas frente a las necesidades presentes en los distintos sectores productivos, de igual forma se clasifica con una investigación de tipo exploratorio descriptivo con el diseño no experimental, puesto que busca entender el comportamiento del mercado junto con comprender las nuevas tendencias tecnológicas y evaluar el escenario de adoptar esta tecnología para la agricultura de precisión. El diseño se estructura en tres dimensiones distintas las cuales son:

- Viabilidad técnica
- Viabilidad de mercado
- Viabilidad económica

Alcance

El proyecto tiene un alcance exploratorio, orientado al análisis de mercado para la importación y comercialización de drones multirrotor impulsados por celdas de combustible de hidrógeno, enfocados en aplicaciones de agricultura de precisión y el tema de seguridad en Colombia. El estudio se centra en la evaluación de la viabilidad económica y de mercado, mediante el análisis del entorno, la identificación de necesidades del cliente y la validación de la aceptación de la tecnología a través de entrevistas a expertos y encuestas a potenciales clientes. Asimismo, se emplea un simulador financiero basado en herramientas existentes para estimar la factibilidad del negocio.

El alcance del proyecto no incluye el diseño, desarrollo o validación experimental de los drones, ni la simulación técnica de su desempeño, limitándose al análisis estratégico y comercial de su posible implementación en el contexto nacional.

La presenta investigación se desarrolla en cinco etapas, en donde se permite construir el análisis.

1. Revisión del estado del arte y análisis del contexto

   Se realiza la revisión sistemática de literatura científica de los últimos 10 años, para demostrar avances tecnológicos en celdas de Hidrogeno, además de sistemas de almacenamiento.

2. Análisis del entorno

   Se desarrolla un análisis estratégico del entorno mediante herramientas de diagnóstico empresarial. Los instrumentos usados son el análisis PESTEL, Modelo de las cinco fuerzas Porter y el análisis DOFA. Con el fin de contextualizar el mercado de drones y la incorporación de esta tecnología en el entorno colombiano

3. Estudio de mercado y validación con expertos

Esta etapa se distribuye en tres partes, la primera es la pre-validación, la cual se efectúa mediante entrevistas con expertos en tecnología, sostenibilidad y modelos de negocio, integrando criterios como la percepción de la tecnología, los riesgos, las oportunidades y las posibles barreras presentes. La segunda etapa es el estudio de clientes, en donde se obtienen las necesidades presentes en los posibles clientes, esto ocurre mediante el mapa de empatía y el perfil del cliente. Esta parte nos permite definir el mercado y entender los desafíos actuales del uso de drones. Por último, la tercera etapa es la validación del mercado, la cual se realiza mediante una encuesta a clientes potenciales y el análisis de la competencia.

4. Definición del modelo de negocio

   Se procede con la propuesta empresarial, en donde se define el modelo de negocio, incorporando aspectos regulatorios y tributarios.

5. Evaluación de viabilidad económica y financiera

   Se elabora un análisis comparativo frente a drones convencionales, mediante indicadores que nos permitan evaluar variables. (costo por hora de operación, incremento de autonomía, reducción de tiempo), además, de ejecutar un simulador financiero basado en el costo total de propiedad (TCO), adicionando variables importantes como el costo de inversión, el costo de operación, el valor presente neto, la tasa interna de retorno y el punto de equilibrio.

6. Análisis de mercado y aplicaciones de VANT impulsados por Hidrogeno

Análisis del entorno

Mapeo – Entrevista de percepción profesional

Con el objetivo de recoger información cualitativa especializada que complementara el análisis técnico y de mercado de la presente investigación, se diseñó y aplicó una entrevista semiestructurada dirigida a profesionales con formación en ingeniería, conformando un grupo de informantes clave. La totalidad de los participantes correspondió

a ingenieros, seleccionados bajo un criterio intencional de muestreo, con el fin de acceder a un público segmentado caracterizado por poseer un nivel de conocimiento técnico avanzado y una comprensión amplia de las limitaciones, requerimientos y desafíos tecnológicos asociados a los procesos de desarrollo del país.

Este instrumento de recolección de información estuvo orientado a identificar la percepción experta sobre la utilidad, viabilidad y pertinencia de los Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) impulsados por hidrógeno, considerando aspectos técnicos, operativos y contextuales. La estructura de la entrevista permitió obtener opiniones fundamentadas desde la experiencia profesional de los entrevistados, aportando insumos relevantes para la evaluación integral de la tecnología analizada.

PESTEL

La primera herramienta de planeación estratégica que se va a utilizar es una muy utilizada en la actualidad que permite identificar y evaluar los factores externos que pueden llegar a afectar el negocio, llamada análisis PESTEL. Esta herramienta nos permite visualizar seis variables para evaluar la viabilidad de nuestra idea de negocio. Según Wheelen et al. (2018), este análisis ayuda a los investigadores y gerentes a tener un esquema del entorno macroeconómico, que visibiliza las oportunidades y amenazas que se encuentran fuera del control directo de la organización, pero que condicionan su éxito operativo.

El modelo PESTEL propone 6 categorías a analizar, de ahí vienen sus siglas, que son: políticas, económicas, sociales, tecnológicas, ecológicas y legales. Se suele recomendar que la relevancia que se le asigne a cada categoría varíe dependiendo del tipo de proyecto que está siendo evaluado. En nuestro caso, como analizaremos una tecnología emergente, como lo son las celdas de hidrógeno para los VANT o drones, las dimensiones tecnológica, legal y ambiental tendrán un peso mayor en este análisis.

Factores políticos:

1. Hoja de Ruta del Hidrógeno: Colombia lanzó una estrategia nacional en 2021 para convertirse en exportador de hidrógeno verde. Mediano plazo. Muy positivo
2. Acuerdos diplomáticos: Colombia firmó acuerdos con Corea del Sur y Alemania, países líderes en tecnología de hidrógeno, para facilitar la investigación y la transferencia tecnológica.
3. Estabilidad y seguridad: El uso de drones en zonas rurales puede estar sujeto a

Factores Económicos:

1. Costos de Importación: En Colombia, la fluctuación de la Tasa Representativa del Mercado (TRM) puede llegar a variar significativamente por decisiones políticas, lo cual afecta directamente el costo de adquisición de las celdas y el dron.
2. Incentivos tributarios: Las leyes colombianas 1715 del 2009, ofrecen beneficios para empresas como exención de IVA y deducción de renta para proyectos relacionados las Fuentes No Convencionales de Energía (FNCE).
3. Costo de la recarga de los drones con hidrógeno: El precio del hidrógeno (gris vs. azul vs. verde) no están bien definidos en el mercado colombiano, y esto determina la viabilidad operativa frente a los drones eléctricos convencionales.

Factores Sociales*:*

1. Adopción de la tecnología: Aún existe una percepción de que no es segura la producción, el almacenamiento y el transporte de hidrógeno (gas a alta presión) Colombia, sobre todo en las ciudades pobladas y transportarlo en las carreteras menos desarrolladas del país.
2. Conocimiento y capacitación técnica: Dado que el hidrógeno es un vector energético nuevo, son pocas las personas formadas para su generación, distribución, transporte y mantenimiento de equipos que utilicen esta tecnología.

3. Impacto social en las comunidades más necesitadas: Colombia es un país montañoso, con carreteras y vías que muchas veces no son eficientes para transportar medicinas o elementos de emergencia. Los drones con una alta autonomía podrían fortalecer la presencia y ayuda gubernamental y ONGs en zonas descuidadas como el Choco o el Amazona.

Factores Tecnológicos:

1. Infraestructura de recarga para drones: Colombia no tiene aún una red de distribución fuerte de Hidrógeno o de Hidrolineras que son los puntos de carga de hidrógeno
2. Desempeño de los drones en lugares de altura: En ciudades de altura como Bogotá, en los que la densidad del aire es mayor, los drones de celdas de hidrógeno tienen una ventaja de funcionamiento técnico comparado con los drones eléctricos.

Factores Ambientales:

1. Es una tecnología que produce cero emisiones directas de CO_2 durante la operación.
2. Deja una huella de carbono más pequeña en comparación con aeronaves tripuladas y vehículos terrestres utilizados para monitoreo agrícola, ayudando a contribuir a los objetivos de descarbonización del sector agropecuario.
3. Al utilizar sensores, cámaras y software para el monitoreo preciso de los cultivos, ayuda a reducir el uso innecesario de fertilizantes y pesticidas que muchas veces en las operaciones con trabajadores se da por errores humanos.
4. Es una tecnología que se alinea con políticas nacionales e internacionales de sostenibilidad con respecto a la transición energética.

Factores Legales:

1. La Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil, tiene la normatividad y reglamentación RAC 100, la cual establece el marco regulatorio para operaciones con drones en Colombia.
2. Compatibilidad con la Hoja de Ruta del Hidrógeno en Colombia, publicada en el año 2021, que promueve tecnologías basadas en hidrógeno.
3. Colombia y varios de sus entes como el Ministerio de Minas y Energía, han mostrado un gran interés gubernamental en apoyar, promocionar e invertir en proyectos que aporten a la transición energética y sostenibilidad.

DOFA

El análisis DOFA, o también FODA, es una herramienta de planificación, que evalúa la situación, en este caso un modelo de negocio. Su nombre proviene de las cuatro iniciales: debilidades, fortalezas, oportunidades y amenazas, que hacen referencia a los factores externos del entorno. Esta metodología permite identificar las capacidades actuales del proyecto. Este análisis facilita tomar decisiones al dar una visión y los elementos que puedan favorecer o limitar la viabilidad del modelo de negocio. Estas fortalezas pueden ser recursos, capacidades o ventajas que se diferencian de la competencia. Las debilidades evidencian limitaciones internas que deben corregirse o mitigarse. Las oportunidades corresponden a condiciones naturales del entorno que pueden aprovecharse para generar crecimiento y finalmente, las amenazas son factores externos que pueden afectar negativamente el desempeño del proyecto.

Tabla 4.

Matriz DOFA

Fortalezas	Oportunidades	Debilidades	Amenazas
Ventaja tecnológica:	**Dispersión territorial:**	**Dependencia extranjera**: Al tratar	**Incertidumbre normativa:** la

Escenarios donde la continuidad operativa es importante los drones HFC ofrecen 4 veces más autonomía que los drones convencionales de baterías	Colombia presenta características que puede favorecer el uso de drones con mayor autonomía por la existencia de zonas rurales con acceso limitado por vía terrestre.	con tecnología emergente en Latinoamérica la cantidad de proveedores es limitado, además de ser vulnerables a cambios abruptos	restricción para vuelos más allá de la línea de vista (BVLOS) puede limitar la adopción comercial, requiere permisos de Aerocivil.
Mayor capacidad útil: Los drones HFC demuestran que pueden transportar cargas más pesadas que drones de baterías.	**Objetivos alineados**: Colombia presenta un plan hacia la descarbonización y reducción de emisiones de CO2	**Alta Inversión inicial**: la importación no solo requiere de la tecnología, sino también de certificaciones, aranceles e infraestructura	**Avance en baterías:** mejores tecnologías reducen la diferencia de autonomía entre drones de baterías y drones HFC
Actor emergente del hidrógeno: La estrategia nacional sobre transición energética promueve un entorno favorable para la propuesta de valor**.**	**Tecnología emergente:** Existe la posibilidad de expandir el modelo de negocio más allá de los drones HFC a estaciones de carga de hidrógeno.	**Infraestructura débil:** La falta de estaciones de recarga o producción local de hidrógeno puede producir resistencia por parte de los clientes potenciales**.**	**Entrada de grandes**: Una vez la demanda crezca empresas con mayor capacidad financiera podrían desplazar importadores iniciales
Nota. Elaboración propia			

Estudio de mercado

Panorama global del mercado de VANT

El mercado global de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) ha experimentado un crecimiento sostenido durante la última década, impulsado por avances tecnológicos en

electrónica, sensores, sistemas de navegación autónoma y nuevas fuentes energéticas. Inicialmente dominado por aplicaciones militares, el mercado ha evolucionado hacia una diversificación en usos civiles y comerciales, convirtiéndose en un sector estratégico para industrias como la agricultura, la energía, la logística, la seguridad y el análisis de datos.

De acuerdo con estudios de mercado recientes, el mercado global de drones comerciales alcanzó valores del orden de decenas de miles de millones de dólares y se proyecta que supere los USD 100.000 millones hacia el año 2030, con tasas de crecimiento anual compuestas (CAGR) elevadas, especialmente en regiones como Asia-Pacífico y América Latina (Data Bridge Market Research, 2023).

Este crecimiento no se limita al hardware, sino que se extiende de manera significativa a los servicios basados en drones, tales como analítica de datos, monitoreo remoto e inspección técnica. En este sentido, el mercado global de Drone Analytics muestra una proyección de crecimiento relevante, pasando de aproximadamente USD 2,1 mil millones en 2021 a valores cercanos a USD 13 mil millones en 2030, reflejando el cambio estructural hacia modelos de negocio basados en datos y servicios (Spherical Insights, 2023).

Segmentación del mercado de drones comerciales

El mercado de VANT puede analizarse a partir de diferentes criterios de segmentación. Desde el punto de vista funcional, se distinguen aplicaciones en seguridad y defensa, cartografía y analítica, agricultura de precisión, inspección industrial, logística y transporte de carga ligera, entre otras.

En términos regionales, América del Norte lidera actualmente el mercado global, seguida por Europa y Asia-Pacífico. No obstante, América Latina muestra una tendencia de crecimiento acelerada, impulsada por la necesidad de soluciones tecnológicas para el

monitoreo de territorios extensos, la protección de infraestructuras críticas y el desarrollo del sector agrícola (UAV Latam, 2024).

En el caso específico de América Latina, el valor total del mercado de drones presenta una proyección ascendente hasta finales de la década, destacándose el crecimiento en los segmentos de geomática y analítica y seguridad y defensa, así como el emergente uso de drones de carga para aplicaciones logísticas (UAV Latam, 2024).

Tendencias tecnológicas del mercado de VANT

El mercado de VANT se ha estado modificando y rediseñando con la aparición de nuevas tecnologías innovadoras que pueden instalarse o acompañar el desempeño de estos equipos como lo son:

- El incremento en la autonomía de vuelo, con baterías de larga duración, utilizadas para operaciones de largo alcance y misiones persistentes.
- La integración de inteligencia artificial y analítica avanzada que les permite a los usuarios observar y analizar de datos recolectados en tiempo real.
- Crecimiento del concepto BVLOS (Beyond Visual Line of Sight), habilitado por mejoras en comunicación, navegación y sistemas energéticos.
- Transición hacia modelos de negocio basados en servicios, donde el valor agregado se encuentra en la información recolectada y analizada, más que en el vehículo en sí.

Estas tendencias refuerzan la importancia de disponer de plataformas energéticamente eficientes, confiables y con alta disponibilidad operativa, características en las que los VANT impulsados por hidrógeno presentan ventajas comparativas frente a los sistemas convencionales basados exclusivamente en baterías (Shen et al., 2024).

Rol de las fuentes energéticas en la competitividad del mercado

La fuente energética utilizada por un VANT influye directamente en su competitividad dentro del mercado. Las limitaciones de las baterías eléctricas tradicionales, como la baja densidad energética y los largos tiempos de recarga, afectan la productividad y rentabilidad de las operaciones, especialmente en aplicaciones comerciales que requieren vuelos prolongados o repetitivos. En este contexto, las pilas de combustible de hidrógeno emergen como un factor diferenciador que permite ampliar los perfiles de misión posibles, reducir los tiempos muertos y mejorar la eficiencia operativa. Casos industriales como los desarrollados por Doosan Mobility Innovation e Intelligent Energy han demostrado que los drones a hidrógeno pueden ofrecer autonomías entre 2 y 4 veces superiores a las de drones eléctricos convencionales, con menores tiempos de reabastecimiento (Doosan Mobility Innovation, 2023; Intelligent Energy, 2024).

Estas mejoras energéticas se traducen en ventajas económicas indirectas, tales como mayor cobertura por misión, reducción del número de despegues y aterrizajes y optimización del uso de personal y equipos en tierra.

Limitaciones actuales de la tecnología VANT

A pesar de su creciente implementación, uno de los principales factores que limita la expansión de las operaciones comerciales con drones es la autonomía de vuelo. La mayoría de los VANT utilizados actualmente emplean sistemas de propulsión eléctrica basados en baterías de polímero de litio, las cuales presentan una densidad energética limitada. En aplicaciones reales, esta restricción se traduce en tiempos de vuelo reducidos y en la necesidad de realizar múltiples ciclos de aterrizaje, recarga y despliegue, afectando la continuidad de las misiones y aumentando los costos operativos.

Esta limitación resulta especialmente crítica en misiones de inspección de largo alcance o en operaciones desarrolladas en zonas remotas, donde el acceso a puntos de recarga eléctrica es limitado o inexistente. En consecuencia, la autonomía energética se

convierte en un factor determinante para la viabilidad técnica y económica de los servicios basados en VANT.

Limitaciones energéticas de los VANT convencionales

A pesar de su rápido desarrollo, los VANT actuales enfrentan una limitación estructural relacionada con el sistema energético. La mayoría de los drones civiles utilizan baterías de ion-litio o polímero de litio como fuente de energía, las cuales presentan una densidad energética relativamente baja. Como consecuencia, los tiempos de vuelo suelen estar restringidos a intervalos cortos, especialmente en plataformas multirrotor y en misiones con cargas útiles significativas.

Esta limitación energética impacta directamente la eficiencia operativa, incrementa los tiempos muertos por recarga y reduce la viabilidad de misiones de larga duración o alcance extendido. En este contexto, la exploración de sistemas de propulsión alternativos, como las pilas de combustible de hidrógeno, surge como una respuesta tecnológica a una de las principales barreras en la evolución de los VANT.

Celdas de combustible de hidrógeno como alternativa tecnológica

Frente a los desafíos asociados a las baterías convencionales, las celdas de combustible de hidrógeno han emergido como una alternativa tecnológica con alto potencial para aplicaciones aeronáuticas no tripuladas. Estos sistemas permiten convertir la energía química del hidrógeno en energía eléctrica de forma continua, ofreciendo una mayor densidad energética y tiempos de operación significativamente superiores a los de las baterías tradicionales.

La utilización de hidrógeno como vector energético presenta, además, ventajas ambientales relevantes, al generar emisiones locales prácticamente nulas durante la operación y al alinearse con los objetivos globales de descarbonización del sector energético. En el ámbito internacional, diversas iniciativas industriales y académicas han

demostrado la factibilidad técnica de VANT propulsados por celdas de combustible, especialmente en misiones de larga duración y operación continua.

No obstante, la implementación de esta tecnología en mercados emergentes plantea interrogantes relacionados con su adaptación a condiciones locales, los costos asociados al suministro de hidrógeno y la disponibilidad de infraestructura adecuada, aspectos que requieren un análisis específico para cada contexto nacional.

Ventajas de las pilas de combustible frente a baterías en VANT

Diversos estudios han demostrado que las pilas de combustible de hidrógeno ofrecen ventajas significativas frente a los sistemas basados exclusivamente en baterías. Entre las más relevantes se encuentran:

- Mayor densidad energética gravimétrica, lo que se traduce en tiempos de vuelo varias veces superiores para una misma masa total del sistema energético (Depcik et al., 2020).
- Reabastecimiento rápido, mediante el intercambio o llenado de cilindros de hidrógeno, en comparación con los largos tiempos de recarga de baterías (McNabb, 2025).
- Menor degradación del sistema, ya que la vida útil de una PEMFC suele ser varias veces superior a la de las baterías de ion-litio bajo condiciones similares de uso (Shen et al., 2024).
- Operación silenciosa y sin vibraciones, lo que protege la instrumentación sensible y amplía las posibilidades de uso en entornos urbanos y misiones de monitoreo (Intelligent Energy, 2024).

Estas ventajas han permitido que drones impulsados por pilas de combustible alcancen autonomías superiores a dos, cuatro e incluso doce horas, frente a los típicos 30–

60 minutos de los drones eléctricos convencionales (Doosan Mobility Innovation, 2023; McNabb, 2025).

Limitaciones y desafíos de los sistemas de propulsión a hidrógeno

A pesar de sus ventajas, los sistemas de propulsión basados en hidrógeno presentan también desafíos técnicos que deben ser considerados. Entre los más relevantes se encuentran el almacenamiento seguro y eficiente del hidrógeno, la integración del sistema energético en plataformas de peso reducido, el costo inicial de los componentes y la necesidad de infraestructura asociada al suministro de hidrógeno (Aziz, 2021).

No obstante, los avances recientes en almacenamiento de hidrógeno comprimido tipo IV, hidrógeno líquido y, especialmente, almacenamiento sólido basado en materiales reticulares han comenzado a mitigar estas limitaciones, ampliando el potencial de adopción de esta tecnología en VANT comerciales y civiles (Shen et al., 2024; McNabb, 2025).

En este contexto, el hidrógeno se consolida como un vector energético estratégico para la evolución de los sistemas de propulsión de los VANT, especialmente en misiones de largo alcance, cargas medias y operaciones continuas, aspecto que resulta fundamental para los estudios de viabilidad técnica y de mercado abordados en esta investigación.

Implicaciones del mercado global para el contexto latinoamericano y colombiano

La evolución del mercado internacional de VANT establece un marco de referencia para el análisis de oportunidades en América Latina y, particularmente, en Colombia. El crecimiento proyectado en sectores como analítica de drones, monitoreo ambiental y seguridad abre espacios para la adopción de tecnologías energéticas avanzadas, alineadas con los objetivos de sostenibilidad y transición energética del país.

La disponibilidad de un marco normativo favorable, sumado al potencial de producción de energías renovables para hidrógeno verde, posiciona a Colombia como un

escenario emergente para el desarrollo y adopción de VANT impulsados por hidrógeno, tanto en aplicaciones civiles como institucionales.

En este sentido, el análisis del mercado global permite identificar tendencias, modelos de negocio y tecnologías clave que pueden ser adaptadas al contexto nacional, aspecto que se abordará con mayor profundidad en los capítulos posteriores de esta investigación.

Relevancia del estudio en el contexto colombiano

Colombia ha manifestado un interés creciente en el desarrollo y adopción de tecnologías limpias, así como en la diversificación de su matriz energética mediante la incorporación de energías renovables y vectores energéticos alternativos como el hidrógeno. En este escenario, resulta pertinente evaluar el potencial de los VANT propulsados por hidrógeno como una solución tecnológica que contribuya tanto a la eficiencia operativa de sectores productivos como a los objetivos de sostenibilidad ambiental del país.

Sin embargo, la adopción de esta tecnología no puede evaluarse únicamente desde una perspectiva técnica. Factores como la viabilidad económica, el marco normativo aeronáutico y energético, la aceptación del mercado y la existencia de modelos de negocio sostenibles son determinantes para su implementación exitosa. En particular, el enfoque en la prestación de servicios mediante drones, en lugar de la venta directa de plataformas, representa una alternativa atractiva para facilitar la adopción tecnológica en el mercado colombiano.

Aplicaciones específicas de VANT a hidrógeno y oportunidades de mercado en Colombia

La adopción de Vehículos Aéreos No Tripulados (VANT) impulsados por pilas de combustible de hidrógeno adquiere especial relevancia en contextos donde las limitaciones

de autonomía de los sistemas eléctricos convencionales restringen la viabilidad operativa y económica de las misiones. En Colombia, la diversidad geográfica, la extensión territorial y las necesidades de monitoreo, logística y seguridad crean un escenario propicio para la implementación de este tipo de plataformas.

Las ventajas técnicas de los VANT a hidrógeno —mayor tiempo de vuelo, menor frecuencia de reabastecimiento y operación con bajas emisiones— se alinean con los retos estructurales del país y con los objetivos estratégicos definidos en la política nacional de transición energética (UPME, 2024).

Vigilancia, seguridad y defensa

Uno de los campos con mayor potencial para la aplicación de VANT a hidrógeno en Colombia es el de la seguridad y vigilancia, tanto en el ámbito civil como institucional. El control de fronteras, la vigilancia de infraestructuras estratégicas, el monitoreo de áreas remotas y la lucha contra actividades ilícitas requieren plataformas capaces de operar durante periodos prolongados sin interrupciones frecuentes por recarga.

Los drones multirrotor y de ala fija impulsados por hidrógeno permiten realizar misiones persistentes, ofreciendo una ventaja operativa clara frente a los drones eléctricos tradicionales, cuyos tiempos de vuelo limitados obligan a realizar múltiples ciclos de aterrizaje y despegue. La posibilidad de alcanzar autonomías de varias horas mejora la continuidad de la vigilancia y reduce la necesidad de personal y equipos de apoyo en tierra (Doosan Mobility Innovation, 2023; Shen et al., 2024).

En el contexto colombiano, estas capacidades resultan particularmente relevantes para zonas de difícil acceso, como regiones selváticas, áreas montañosas y zonas costeras extensas, donde la logística terrestre es compleja y costosa.

Monitoreo ambiental y control territorial

Colombia es uno de los países con mayor biodiversidad a nivel mundial, lo que implica la necesidad de herramientas eficaces para el monitoreo ambiental, la detección temprana de deforestación, la vigilancia de parques naturales y el seguimiento de fenómenos naturales. En este ámbito, los VANT se han consolidado como instrumentos clave de observación remota.

La incorporación de sistemas de propulsión a hidrógeno amplía significativamente las posibilidades de monitoreo, al permitir vuelos de largo alcance y mayor cobertura territorial en una sola misión. Esto resulta especialmente útil para el seguimiento de grandes áreas protegidas y cuencas hidrográficas, reduciendo costos operativos y mejorando la eficiencia de las labores de control ambiental (UAV Latam, 2024).

Además, el uso de hidrógeno verde como fuente energética refuerza la coherencia ambiental de estas aplicaciones, al minimizar el impacto ecológico de las herramientas empleadas para la protección del territorio.

Agricultura de precisión a gran escala

El sector agrícola colombiano enfrenta el reto de incrementar su productividad de forma sostenible, optimizando el uso de recursos y reduciendo impactos negativos al medio ambiente. La agricultura de precisión, apoyada en datos obtenidos mediante VANT, se ha convertido en una estrategia clave para alcanzar estos objetivos.

Los VANT a hidrógeno presentan ventajas significativas en explotaciones agrícolas de gran extensión, donde los tiempos de vuelo limitados de los drones eléctricos convencionales obligan a fraccionar las misiones y aumentan los tiempos muertos. La mayor autonomía de los drones impulsados por pilas de combustible permite realizar levantamientos completos en menos ciclos operativos, mejorando la eficiencia del proceso y la calidad de los datos recolectados (Shen et al., 2024).

Este tipo de plataformas resulta especialmente atractivo para regiones agrícolas extensas del país, donde la eficiencia en la captura y análisis de información se traduce directamente en mejoras económicas y productivas.

Inspección de infraestructuras energéticas y de transporte

Otro segmento de alto potencial para los VANT a hidrógeno en Colombia es la inspección de infraestructuras críticas, como líneas de transmisión eléctrica, oleoductos, gasoductos, plantas solares y eólicas. Estas infraestructuras suelen extenderse por largas distancias y atraviesan zonas de difícil acceso, lo que incrementa los costos y riesgos de las inspecciones tradicionales.

Los drones impulsados por hidrógeno permiten cubrir mayores tramos de infraestructura en una sola misión, reduciendo el número de vuelos necesarios y mejorando la continuidad de las inspecciones. Casos industriales documentados han demostrado que este tipo de plataformas puede reducir de manera significativa los tiempos y costos de inspección, manteniendo altos estándares de seguridad y precisión (Doosan Mobility Innovation, 2023).

En un país que avanza hacia la diversificación de su matriz energética, este tipo de soluciones se perfila como un complemento tecnológico clave para la operación y mantenimiento de infraestructuras energéticas.

Logística, transporte y atención de emergencias

La logística de suministros médicos y atención a emergencias representa otra aplicación estratégica para los VANT a hidrógeno. En situaciones de desastre natural, conflictos o emergencias sanitarias, la capacidad de transportar carga ligera de manera rápida y autónoma puede marcar una diferencia crítica.

En Colombia, donde existen regiones con acceso limitado o donde las vías de comunicación pueden verse comprometidas, los drones a hidrógeno ofrecen una solución eficaz para la entrega de medicamentos, equipos de emergencia y otros insumos esenciales. La mayor autonomía y la rapidez de reabastecimiento del hidrógeno permiten mantener operaciones continuas incluso en condiciones adversas (Doosan Mobility Innovation, 2023; Intelligent Energy, 2024).

Síntesis de oportunidades de mercado en Colombia

El análisis de las aplicaciones específicas evidencia que los VANT impulsados por hidrógeno cuentan con múltiples oportunidades de adopción en el mercado colombiano, particularmente en sectores donde la autonomía, la cobertura y la sostenibilidad son factores determinantes. La convergencia entre políticas de transición energética, necesidades territoriales y avances tecnológicos crea un escenario favorable para el desarrollo progresivo de este tipo de plataformas. Estas oportunidades justifican la necesidad de evaluar de manera sistemática la viabilidad técnica, económica y estratégica de los VANT a hidrógeno en el contexto colombiano, análisis que será abordado en los siguientes capítulos de esta investigación.

Estudio de clientes

Población

La población objetivo del estudio está conformado por las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) ubicadas en la región Andina de Colombia. La información fue obtenida a partir de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA, 2023) realizada por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), que posteriormente actualizó la información el 30 de julio del 2025.

Se consideró la totalidad de los UPAs registradas para Colombia, en donde se descartaron las UPAs pertenecientes a otras regiones diferentes a la Andina. Posteriormente, se excluyeron los departamentos cuyos coeficientes de variación estimados (CVE) no presentaban niveles aceptables de precisión estadística como lo es el caso del Huila con un 23,6. Además, se descartaron las UPAs menores a 5 hectáreas, debido a que el modelo de negocio según la tecnología de los drones que funcionan con hidrógeno está orientado a operaciones agrícolas de mediana y gran escala. Otro criterio aplicado fue el poder adquisitivo que tiene los UPAs para industrializar la cual es del 16% según una noticia de Finagro con datos del DANE teniendo como resultado del proceso de selección una población objetivo de 64445 UPAs.

Para determinar el tamaño de la muestra para las encuestas, se empleó la población a partir de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) seleccionadas para el estudio (64,445). Posteriormente, se aplicó un muestreo probabilístico para poblaciones finitas con la siguiente ecuación, utilizando un nivel de confianza del 95% y del 90% y un margen de error del 5% y 10%. Los resultados arrojan que el mínimo de encuestas debe ser de 68 o para tener mayor valor en los resultados y solo un 5% de error debemos tener 382 encuestas.

$$n = \frac{N \cdot Z^2 \cdot p \cdot q}{e^2 \cdot (N-1) + Z^2 \cdot p \cdot q} \qquad (1)$$

Tabla 5.

Niveles de confianza de la población y muestra

Nivel de confianza	Margen de error	Muestra
90%	10	68
95%	5%	382

Nota. Elaboración Propia

Validación del mercado

Para validar el mercado se utilizó una encuesta a personas del sector o posibles clientes que se encuentren interesados en el tema. Debido a la falta de respuestas, se tomó la decisión de trabajar con un nivel de confianza del 90%. Ya que no se logró conectar con 382 personas para aumentar la veracidad de los datos.

Interés y nivel de adopción de drones agrícolas

Los resultados de la encuesta presentan un potencial de adopción de tecnologías basadas en drones. Aunque únicamente el 25,3 % (sumando a las personas que actualmente si lo usan) de los encuestados manifestó utilizar drones actualmente en sus operaciones agrícolas, el 53,0 % informo que no los utiliza, pero tiene curiosidad o interés

en hacerlo. Demostrando que existe una oportunidad de mercado por productores y administradores agrícolas que reconocen la tecnología como una posible herramienta.

Figura 2.

Uso de drones en Colombia

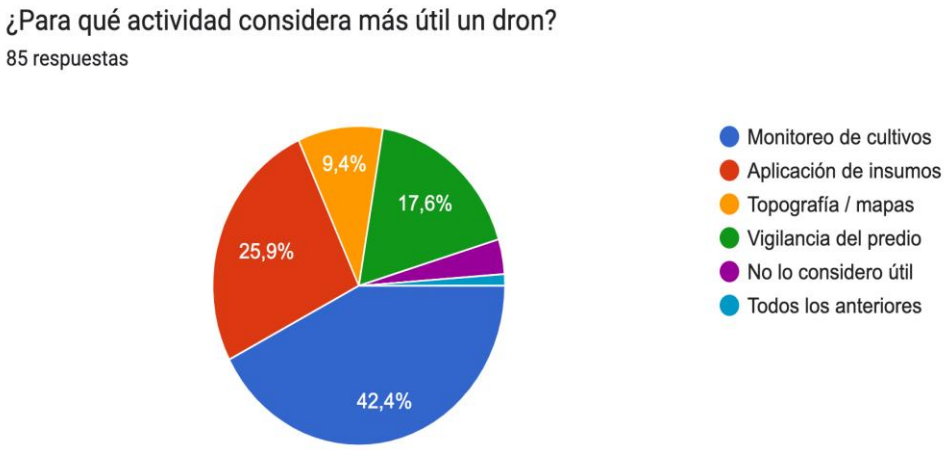
Nota. Elaboración Propia

Aplicaciones de mayor interés para los usuarios

La principal aplicación identificada fue el monitoreo de cultivos, seleccionada por el 42,4 % de los participantes. En segundo lugar, se ubicó la aplicación de insumos agrícolas con un 25,9%. Estos resultados muestran que los productores perciben a los drones principalmente como una herramienta para mejorar la supervisión de los cultivos y optimizar la toma de decisiones en campo, lo que coincide con las tendencias actuales de agricultura de precisión.

Figura 3.

Actividades más útiles de los drones



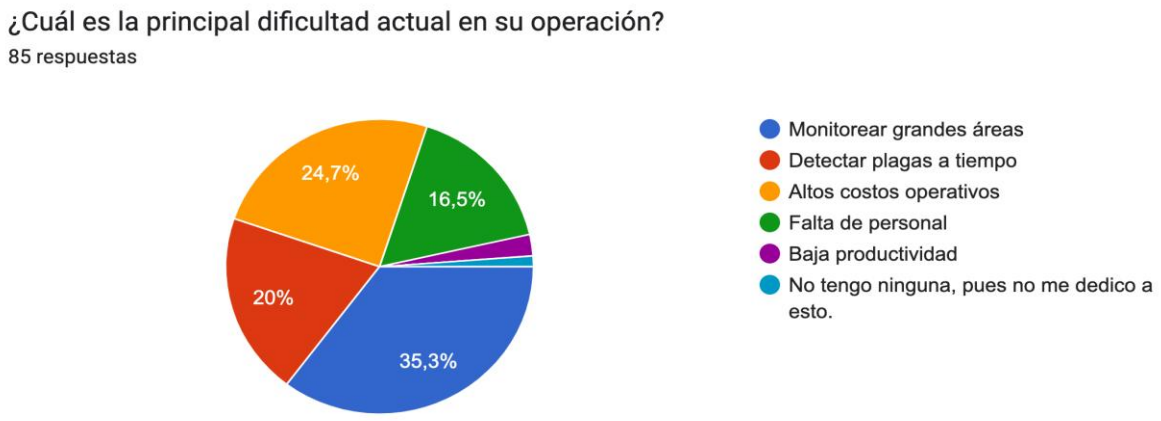
Nota. Elaboración propia

Principales problemáticas del sector

Durante esta pregunta se ven los distintos ámbitos a mejorar siendo mencionada por los encuestados, el problema más recurrente es el monitoreo de grandes áreas agrícolas con un 35,3 % de las respuestas. El 24,7 % señaló los altos costos operativos y el 20% la dificultad para detectar plagas a tiempo. Estos resultados indican que existe una necesidad real de soluciones que nos permitan aumentar la cobertura operativa, mejorar la eficiencia de supervisión y reducir costos asociados a las actividades agrícolas.

Figura 4.

Dificultades presentes en la operación de drones



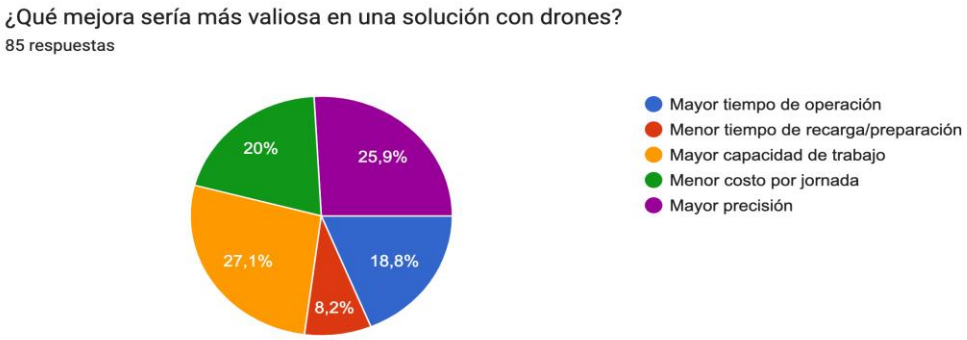
Nota. Elaboración propia

Características más valoradas en una solución con drones

Entre las mejoras esperadas por los usuarios, se busca que mejore la mayor capacidad de trabajo obtuvo la mayor preferencia con un 27,1 %, seguida por aumentar la precisión con un 25,9% y una mayor autonomía de operación con un 18,8 %. Este hallazgo es importante para el proyecto, ya que demuestra que los productores valoran capacidades asociadas a una mayor productividad y tiempo de operación, aspecto que podría mejorar con la implementación de tecnologías de propulsión basadas en hidrógeno.

Figura 5.

Soluciones con mayor valor



Nota. Elaboración propia

Interés de contratación

Los resultados muestran una alta aceptación del mercado hacia servicios avanzados con drones. El 55,3 % de los participantes se declaró interesado y el 30,1 % muy interesado en contratar este tipo de soluciones. Sin embargo, se debe de tener en cuenta que algunas opiniones o deseos pueden llegar a ser curiosidad, esto no garantiza que las personas estén a favor de comprar drones.

Figura 6.

Interés en los drones para agricultura de precisión

Nota. Elaboración propia

Modelo de acceso preferido

La opción preferida fue la compra directa de los equipos, seleccionada por el 50,6 %. Sin embargo, un 20% prefiere la contratación de servicios por hectárea, mientras que otros participantes optaron por esquemas de alquiler o planes mensuales. Esto sugiere que el mercado presenta oportunidades tanto para la comercialización de equipos como para la prestación de servicios especializados, ya sea por área o por frecuencia.

Figura 7.

Preferencia en la adquisición

Nota. Elaboración propia

Disposición de pago por servicios

Respecto al modelo de prestar el servicio con drones, el rango más aceptado para la contratación fue de “entre $300.000 y $700.000 COP”, seleccionado por el 43,5% de los encuestados. Adicionalmente, un 14,1 % estaría dispuesto a pagar entre $700.000 y $1.200.000 COP. Esto nos permite establecer una referencia para la estructuración de precios para la venta del servicio.

Figura 8.

Disposición para la prestación de servicio

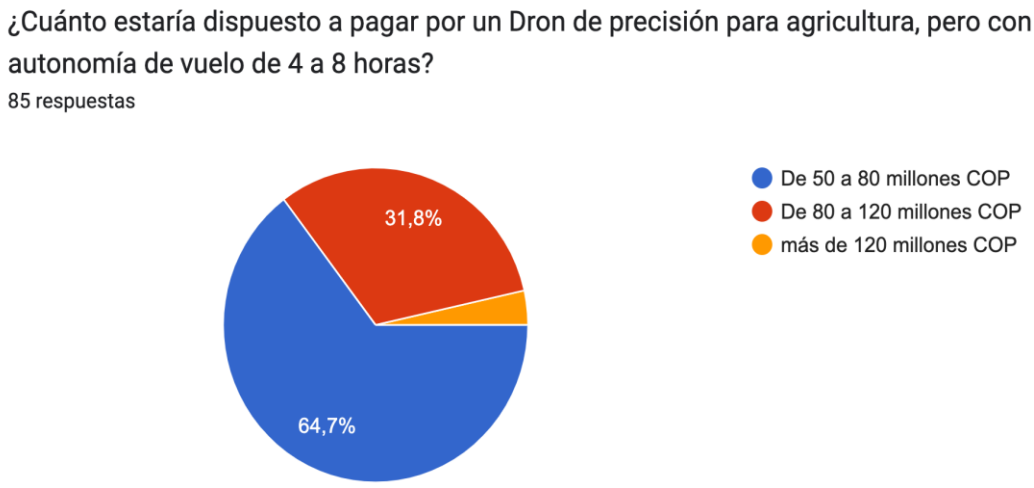
Nota. Elaboración propia

Disposición de pago por un dron de alta autonomía

Al consultar sobre un dron de precisión con una autonomía de 4 a 8 horas, el 64,7 % de los encuestados manifestó estar dispuesto a pagar entre 50 y 80 millones de pesos, mientras que el 31,8 % aceptaría pagar de 80 a 120 millones de pesos. Estos resultados indican que el mercado busca una disminución de costos para la compra de estos equipos o la mejora en ciertas características por un valor similar a los drones ya presentes en Colombia.

Figura 9.

Disposición para la compra de drones de hidrogeno



Nota. Elaboración propia

Análisis TAM SAM SOM

Para el análisis se utilizaron los datos de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA) del 2023 realizada por el DANE, que actualizó la información el 30 de julio del 2025.

TAM: En este caso se delimito las Unidades Productoras Agropecuarias (UPA) de la región Andina y se excluyó las regiones con menor confiablidad, en este caso el Huila.

Tabla 6.

UPAs de la región Andina

	UPA	Cve
Total 27 departamentos	**1.970.575**	**2,8**
Total, Región Andina	**1.209.769**	**3,2**
Antioquia	136.999	12,2
Boyacá	378.283	3,9
Caldas	34.069	11,6
Cundinamarca	242.251	7,2
Huila	99.508	23,6
Norte de Santander	55.540	9,2
Quindío	10.440	9,0
Risaralda	29.110	7,3
Santander	108.483	7,4
Tolima	115.085	7,4

Nota. Adaptado de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA), 2025.

Posteriormente se tomó la decisión de solo incluir las UPAs mayores a 5 hectárea, puesto que la tecnología se encuentra desarrollada para trabajar en grandes espacios, debido a la alta autonomía en comparación de los drones convencionales.

Tabla 7.

UPAs con más de 5 hectáreas en la Región Andina

	De 5 a < 10 Hec	De 10 a < 50 Hec	De 50 a < 100 Hec	De 100 a < 500 Hec	De 500 a < 1.000 Hec	De 1.000 y más Hec
	UPA	UPA	UPA	UPA	UPA	UPA
Total 27 departamentos	**275.185**	**346.174**	**67.940**	**67.934**	**6.542**	**6.858**
Total, Región Andina	**171.977**	**205.968**	**31.089**	**22.930**	**1.215**	**322**
Antioquia	21.782	37.113	4.881	8.295	502	77
Boyacá	34.289	31.847	2.965	1.650	79	26
Caldas	6.241	5.868	895	1.362	11	14
Cundinamarca	27.914	29.971	3.659	1.504	74	15
Huila	12.973	13.698	2.286	1.698	63	3
Norte de Santander	10.837	23.417	4.918	2.017	31	7
Quindío	2.261	2.929	332	69	3	4
Risaralda	4.716	2.927	134	128	2	8
Santander	26.835	35.175	6.554	3.705	413	134
Tolima	24.129	23.021	4.465	2.501	37	34

Nota. Adaptado de la Encuesta Nacional Agropecuaria (ENA), 2025.

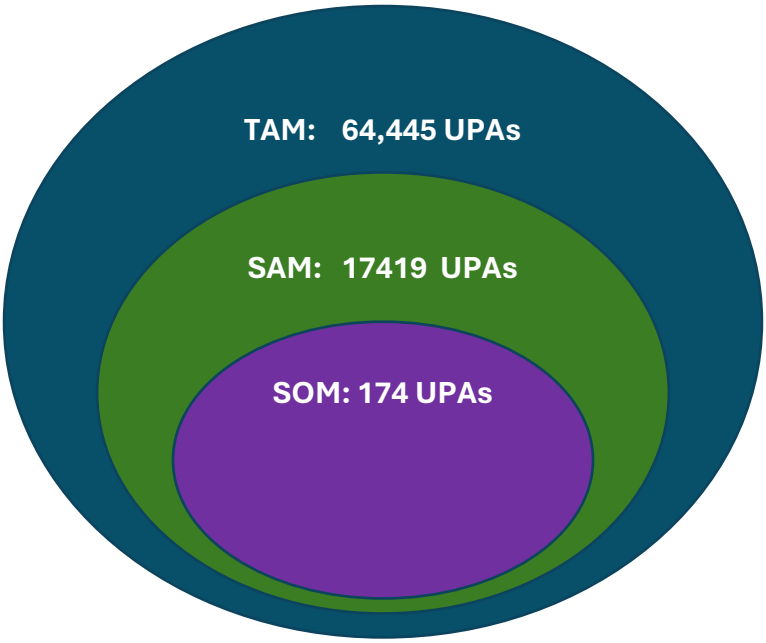
De esta forma se logró obtener los UPAs mayores a 5 hectáreas ubicadas en la región Andina, con un total de 402.780. Ya por último para encontrar el TAM, se encontró que, según el DANE, solo el 16% de las UPAs tienen el poder adquisitivo o la capacidad de industrializar sus actividades productivas. Es decir que solo **64.445** de UPAs tienen la posibilidad de comprar drones, siendo este nuestro TAM

SAM: Para la construcción de este segmento se utilizó los resultados de la encuesta, en donde solo el 53% se encuentra interesado en la aplicación de esta tecnología en sus actividades productivas; es decir 34,155 UPAs. Sin embargo, no todos buscan el mismo mecanismo para aplicar esta tecnología, según la encuesta un 49.4% busca una empresa dedicada a la prestación del servicio, no se encuentra interesado en adquirir el producto. En este caso solo el 50,6% que equivale a **17,419** UPAs estarían interesados en comprar drones.

SOM: Debido a que la tecnología propuesta corresponde a una tecnología innovadora que aún no tiene una penetración en el mercado, se adoptó una participación de mercado conservadora del 1 % sobre el mercado objetivo. Esta estimación representa un escenario prudente de adopción durante las etapas iniciales de comercialización del producto. De esta forma el 1% es de 174 UPAs.

Figura 10.

Representación gráfica del TAM-SAM-SOM



Nota. Elaboración propia.

7. Modelo de negocio

Naturaleza del proyecto

En el año 2025 en el mes de Julio la empresa Comercializadora Integral Monaco SAS de Bogotá, tuvo la oportunidad de asistir a la feria comercial KEET: Korea Energy and Environment Trade Fair (Feria Comercial de Corea de Energía y Medio Ambiente). En esta feria se lograron establecer acuerdos comerciales de cooperación para la importación de productos relacionados con sostenibilidad, energía y medio ambiente con varias empresas coreanas. Entre estas empresas, dos de ellas han desarrollado drones que funcionan con celdas de hidrógeno. Así, la empresa Comercializadora Integral Monaco SAS tiene el objetivo de evaluar la viabilidad de importar y comercializar dichos drones en Colombia. Esta empresa fue fundada el 24 de Julio de 2009 con NIT 900302016-9, considerada actualmente dentro de la categoría de las PYMES, ubicada en la ciudad de Bogotá, Colombia.

Propuesta de negocio

El modelo de negocio y la propuesta de valor que se propone consiste en dos partes. La primera, es importar y comercializar en Colombia drones para la agricultura de precisión con una tecnología de punta fabricados en Corea del Sur que utilizan celdas de hidrógeno para ser propulsados, los cuales: tienen mayor autonomía de vuelo frente a drones eléctricos convencionales; tienen menor tiempo de recarga y utilizan una energía renovable que está en crecimiento dentro del plan de la transición energética de Colombia.

Aunque se ha hecho el análisis principalmente para clientes del sector agrícola, no se descartan futuros clientes en otros sectores económicos como el sector minero energético, de seguridad y gubernamental.

Por otro lado, la segunda parte de la propuesta de valor consiste en ser un proveedor con servicio integral que haga acompañamiento en diferentes áreas. Dado que esta es una tecnología nueva, se establece un acuerdo de confidencialidad entre las dos empresas, la Coreana y la Colombiana, para prestar servicio técnico en español en Colombia, realizar las capacitaciones de uso a los pilotos de los drones, revisión y solicitud de garantías con el fabricante en caso de ser necesario y venta de repuestos o partes adicionales como los tanques de hidrógeno, así como cualquier otro servicio relacionado con el aseguramiento del correcto funcionamiento de los drones en Colombia.

Descripción de las actividades del negocio: Importación de drones VANT desde Corea del Sur; Comercialización en Colombia; Capacitación a clientes; Soporte técnico en español; Gestión de mantenimiento y garantías; Asesoría sobre carga y manejo del hidrógeno; Conexión entre fabricantes y usuarios colombianos.

Canales comerciales

La empresa trabaja principalmente con ventas directas al reunirse con los clientes y entender sus necesidades. Sin embargo, también cuenta con una página web corporativa (https://cimsas.com.co/). Por otro lado, se aspira en la segunda mitad del 2026 crear redes sociales y participar en ferias agrícolas y tecnológicas para promocionar el dron, así como

generar alianzas con empresas y agrupaciones agrícolas para motivar y presentar los beneficios técnicos, financieros y ambientales de estos drones.

Actividades específicas por las cuales se va a cobrar

Si bien, la principal actividad económica será la venta de los drones, también generaremos ganancia por: venta de accesorios y repuestos, los servicios de capacitación, servicios de mantenimiento, soporte técnico, y venta y actualización de licencias del software.

Recursos y Socios estratégicos

Para lograr implementar este modelo de negocio se requiere de varios recursos, de los cuales ya se cuenta con algunos y otros están en proceso. Ya se estableció la alianza con fabricantes coreanos, hay personal técnico especializado, red de soporte técnico en inglés desde Corea y traductora al español en Colombia, bodega para almacenamiento en la ciudad de Bogotá y especialistas en hidrógeno y seguridad energética de acuerdo con las normatividades colombianas. Están en proceso: la plataforma logística de importación y la certificación en conocimiento normativo aeronáutico y pilotaje de drones en Colombia.

La empresa propone fortalecer este mercado en Colombia sirviendo como punto de conexión entre: los fabricantes de los drones, empresas de hidrógeno aquí en Colombia, universidades para promover la investigación, empresas y gremios agrícolas, entidades regulatorias como la GREG y operadores logísticos de importación de drones.

Costos principales

Para el modelo de negocio se deben tener en cuenta principalmente los costos de: importación y aranceles; capacitación del personal técnico; garantías, soporte y mantenimiento; y certificaciones y regulación aeroespacial.

8. Resultados y discusión: Evaluación de la viabilidad de VANT impulsados por Hidrogeno en Colombia

Resultados del análisis de viabilidad técnica

Las entrevistas aplicadas a posibles clientes u operadores demuestran que la tecnología de drones agrícolas ya es funcional y utilizada en operaciones reales de fumigación y fertilización en Colombia. Especialmente en regiones como la Sabana de Bogotá, Boyacá, Meta y Honda. Pero, una de las principales limitantes técnicas identificados es la autonomía de vuelo. Los operadores reportan tiempos promedio entre 12 y 25 minutos por batería dependiendo de variables como la altura, la carga y las condiciones de operación. Esto obliga al uso de múltiples baterías, estaciones de carga rápida y plantas eléctricas de gran capacidad, aumentando la complejidad operativa.

Otro aspecto es que la logística energética representa un reto importante, en donde los operadores deben transportar gasolina, plantas eléctricas, estaciones de carga y varias baterías en camionetas grandes adaptadas para mantener la continuidad de la operación. Garantizar la distribución de energía es indispensable hoy en día para la operación de drones eléctricos. Existen factores que afectan el desempeño y la seguridad de la tecnología como lo son la lluvia, el viento, los terrenos inclinados y los obstáculos, de hecho, durante las entrevistas se reportó accidentes relacionados a las hélices y aterrizajes

De acuerdo con los operadores de drones, ellos consideran que aumentar la autonomía mejoraría significativamente la productividad y reduciría tiempos operativos. Esto evidencia una oportunidad técnica para tecnologías alternativas como drones impulsados por Hidrógeno, aunque persisten preocupaciones relacionadas con seguridad, abastecimiento y manipulación del Hidrógeno en campo.

Resultados del análisis de viabilidad de mercado

El análisis de mercado confirma un entorno altamente favorable para la adopción de VANT a hidrógeno en el mediano plazo, tanto a nivel global como regional. Las proyecciones indican que el mercado de drones comerciales superará los USD 100.000 millones hacia 2030, con un crecimiento particularmente fuerte en servicios de analítica, monitoreo e inspección (Data Bridge Market Research, 2023).

En América Latina, el mercado muestra un crecimiento acelerado impulsado por la necesidad de soluciones tecnológicas para territorios extensos, infraestructura dispersa y entornos de alta complejidad geográfica (UAV Latam, 2024). Colombia se inserta en este escenario como un país con alta demanda potencial, derivada de:

- Necesidades de control y vigilancia territorial.
- Expansión de infraestructura energética.
- Importancia estratégica del sector agrícola.
- Requerimientos de logística en zonas remotas.

La disponibilidad de un marco normativo favorable al hidrógeno, sumada a los objetivos del Plan Energético Nacional 2024–2054, fortalece las condiciones para la introducción gradual de estas tecnologías, especialmente mediante proyectos piloto y esquemas de cooperación academia-industria-Estado (UPME, 2024). Además de que de acuerdo con el Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional y Eficiente de la Energía (PAI-PROURE) este tipo de proyectos cuenta con apoyo porque contribuyen con la generación de FNCER y la Gestión Eficiente de la Energía (GEE).

Según las encuestas podemos evidenciar que hay un punto de vista positivo hacia la incorporación de tecnologías de agricultura de precisión dentro de las actividades productivas. Esto nos permite identificar un mercado en etapa crecimiento, donde hay un

número potencial de clientes o usuarios que no han usado estas herramientas, pero reconocen los beneficios de autonomía.

Las necesidades identificadas por los encuestados se relacionan con el monitoreo de cultivos, la supervisión de grandes terrenos y la optimización de los procesos. Otro hallazgo es la frecuencia de uso estimado, ya que varios manifiestan que utilizarían el servicio de drones de forma periódica, lo que nos indica que existe la posibilidad de mantener o crear otro modelo de negocio basado en la prestación de servicio especializado.

En conclusión, los resultados permiten evidenciar que hay un mercado con interés, con bastantes necesidades; Que buscan obtener una mejora considerable manteniendo el precio de los drones convencionales o poder encontrar precios más competitivos con las mismas condiciones.

Resultados del análisis de viabilidad económica -Simulador financiero

Para el análisis del simulador financiero se establecieron principalmente 6 productos con los siguientes valores de costo y de venta:

Tabla 8.

Costo de productos a importar

Producto	Valor costo	Valor de Venta
Dron con celdas de hidrógeno	230.000.000	266.000.000
Tanque de hidrógeno de 3.5 L	7.500.000	9.000.000
Tanque de hidrógeno de 9L	10.500.000	12.600.000
Tanque de hidrógeno de 12L	13.000.000	15.600.000
Tanque de hidrógeno de 20L	17.000.000	20.400.000
Bombas y boquillas	16.000.000	19.200.000

Nota. Elaboración propia.

De estos productos se establece que se venderán 24 drones el primer año, es decir 2 drones por mes y que, por cada dron, cada cliente compre un tanque de repuesto y las boquillas con su bomba para la aspersión de los cultivos. Razón por la cual nos arroja un resultado de ingresos totales de $ 6.384.000.000 por venta de drones, $108.000.000 por venta de tanques de hidrógeno y $460.800.000 por venta de Bombas y Boquillas. Para un total de $6.952.800.000 de ingresos en el primer año por ventas.

Calculamos un 1% de crecimiento anual de ventas para tener un perfil conservador, ya que se considera que, aunque es una tecnología muy interesante, sus costos elevados pueden ser un motivo de demora en la compra de esta. Por otro lado, utilizamos un porcentaje de inflación del 3% anual (Banco de la República, 2025) y dado que no existen proyecciones oficiales de largo plazo para el Índice de Precios del Productor (IPP), se asumió una tasa anual del 3%. Esto se hace según la tasa consistente con la meta de inflación establecida por el Banco de la República anteriormente mencionada y con un escenario de estabilidad de precios en la economía colombiana. Para concluir la primera parte, se estableció la tasa al impuesto de renta sobre las ganancias en un 35%.

La segunda parte del análisis financiero se enfoca en las inversiones iniciales para la puesta en marcha del proyecto. Teniendo en cuenta que la empresa Comercializadora Integral Monaco SAS ya existe, muchas de las inversiones iniciales se establecieron en cero como lo son: Terrenos, porque ya se cuenta con una bodega e instalaciones de oficina propias; Propiedad, planta y equipos; muebles, enceres y equipos de transporte. Las únicas inversiones iniciales son: $507.000.000, que es el valor de 2 drones, 2 tanques de 3,5 L y dos bombas con boquillas para tener de demostración aquí en Bogotá; $72.000.000 millones de nómina de 2 ingenieros en energías el primer año; y $12.000.000 de marketing y publicidad anual para dar a conocer el producto.

En la tercera fase del simulador, se marca muestra entonces un total de $592.440.000 como total de la inversión inicial, de los cuales, la empresa ya dispone de $200.000.000 y se pedirá un crédito de libre inversión a una tasa de aproximadamente el

16% de $392.440.000 a 5 años. Finalmente, mostraremos en la siguiente tabla los datos más significativos del simulador:

Tabla 9.

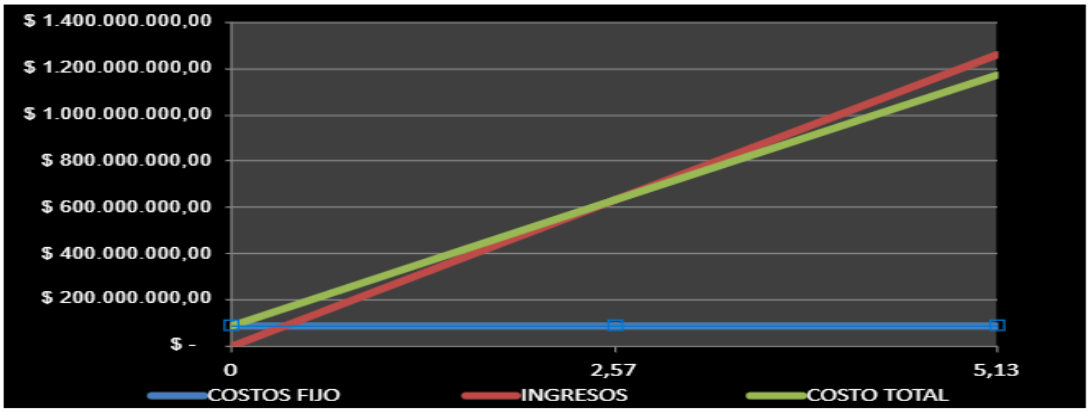
Principales indicadores financieros.

Indicadores financieros	
Tasa de evaluación del proyecto	20%
Valor presente del proyecto	$797.550.160
Tasa Interna de Retorno	59,40%
Periodo de recuperación de la inversión	2,13 años
Punto de equilibrio	2.57 unidades
Valor ventas mínimas en total sin IVA	$630.467.624

Nota. Elaboración propia

Figura 11.

Punto de equilibrio



Nota. Elaboración propia. Adaptada del simulador financiero institucional.

9. Conclusiones

En este estudio se concluye que sí es viable, tecnológica, ambiental y económicamente, la implementación de drones propulsados por celdas de hidrógeno para la agricultura de precisión en Colombia. Desde la parte técnica, se confirma que este tipo de tecnología de celdas de hidrógeno en drones, que funciona gracias al proceso químico de electrólisis, utiliza una fuente energética que es renovable y sostenible en el tiempo, aportando a la transición energética del país. Además, es una tecnología innovadora en el mundo, que, aunque se empezó a desarrollar principalmente con fines de vigilancia militar por países como Corea del Sur, China, Israel y Ucrania, hoy en día empieza a abrirse el mercado para nuevas aplicaciones en otros sectores como el agrícola.

Los resultados de la aplicación de la metodología prisma de revisión sistemática y metaanálisis de artículos científicos confirmaron la novedad de esta tecnología en el mundo, y aún más, en su uso para agricultura de precisión, tanto así, que se obtuvieron tan solo 22 artículos favorables y útiles para el estado del arte de este trabajo. En ellos obtuvimos comparaciones técnicas, entre los drones eléctricos y los propulsados por celdas de hidrógeno, mostrando superioridad en temas de tiempo de autonomía de vuelo, tiempos de carga, eficiencia energética y sostenibilidad. Por otro lado, encontramos comparaciones de diseño y mecánica de los drones, con lo cual se demostraba que los drones más eficientes y seguros para la aspersión y vigilancia de cultivos son los híbridos, multirrotor de 4 ejes y con ala fija, descripción que encaja perfectamente con el modelo cotizado de los fabricantes en Corea del Sur.

En los análisis estratégicos realizados para comprender el entorno, el mercado y la posición competitiva de esta tecnología, se encontraron factores favorecedores como lo son: políticas alineadas con la transición energética y la hoja de la ruta del hidrógeno en Colombia; Descuentos de renta para las empresas que inviertan en sistemas de energías renovables; El posible incrementar de empleos verdes al contratar y formar ingenieros en energías que trabajen promocionando, y capacitando a los futuros clientes en el uso de este tipo de drones y el manejo especial con los tanques de hidrógeno; La excelente acogida de este tipo de drones, porque la llegada de los drones eléctricos para agricultura de precisión, ha establecido un ambiente de confianza frente al uso de este tipo de tecnologías; El impacto positivo en el medio ambiente; y la existencia de leyes claras y precisas para la acogida de esta nueva tecnología con normatividades claras de la UPME, la CREG y la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil que regula el uso y operación de los drones industriales.

Las entrevistas y encuestas realizadas a expertos de las áreas de tecnología, emprendimiento, sostenibilidad, política e industria agroalimentaria, mostraron que hay un

gran interés y aceptación de la nueva tecnología con dos condiciones: la logistica necesaria de la puesta en marcha de los drones en cuanto a la compra y recarga de los tanques de hidrógeno, cuya estructura en Colombia aún no se encuentra consolidada y los precios de venta, garantías y mantenimientos conparados con los costos que ya se tienen de los drones eléctricos. Sin embargo, muchos afirman también, que aceptarían pagar más de lo que pagarían por un dron convencional teniendo en cuenta sus múltiples especificaciones que superan los actuales.

Finalmente, dentro de los puntos a revisar para consolidad un mercado fuerte en Colombia, se encuentran los siguientes: revisar el proceso de importación a Colombia para mejorar los porcentajes de aranceles, podría ser desde la importación por partes y no del dron completo, ganando espacio en el embalaje; Cotizar con otros países que están desarrollando la misma tecnología ya teniendo esta base con la empresa se Corea del Sur; Evaluar también la importación de las máquinas que convierten electricidad y agua en hidrógeno para recargar los tanques de los drones y no depender únicamente de los proveedores colombianos, ya que como se había mencionado anteriormente, este mercado de hidrógeno aún no está completamente consolidado; y por último conquistar nuevos mercados, como el sector de seguridad gubernamental y privada, topografía, monitoreo de líneas eléctricas o gasoductos de manera remota, entre otros.

10. Referencias

Airbus. (2023). ZEROe: Towards the world's first hydrogen-powered commercial aircraft. https://www.airbus.com/en/innovation/low-carbon-aviation/hydrogen/zeroe

Apeland, J., Pavlou, D. G., & Hemmingsen, T. (2021). Sensitivity study of design parameters for a fuel cell powered multirotor drone. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 102(6). https://doi.org/10.1007/s10846-021-01380-5

Ariza, L. A., & Molano Pulido, R. M. (2023). Hidrógeno como fuente de combustible: Una apuesta para el sector aeronáutico. XX Congreso Latino-Iberoamericano de Gestión Tecnológica y de la Innovación (ALTEC), Paraná, Argentina.

Aziz, M. (2021). Liquid hydrogen: A review on liquefaction, storage, transportation, and safety. Energies, 14(19), 5917. https://doi.org/10.3390/en14195917

Banco de la República. (2025, 28 de noviembre). *La Junta Directiva del Banco de la República reitera la meta de inflación del 3%*. Banco de la República. https://www.banrep.gov.co/es/noticias/junta-directiva/meta-inflacion-2026

Belmonte, N., Staulo, S., Fiorot, S., Luetto, C., Rizzi, P., & Baricco, M. (2018). Fuel cell powered octocopter for inspection of mobile cranes: Design, cost analysis and environmental impacts. Applied Energy, 215, 556–565. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.02.065

Bowen, G. A. (2009). Document analysis as a qualitative research method. Qualitative Research Journal, 9(2), 27–40. https://doi.org/10.3316/QRJ0902027

Boukoberine, M. N., Donateo, T., & Benbouzid, M. (2022). Optimized energy management strategy for hybrid fuel cell powered drones in persistent missions using real flight test data. IEEE Transactions on Energy Conversion, 37(3), 2080–2091. https://doi.org/10.1109/TEC.2022.3156806

Congreso de la República de Colombia. (2021). Ley 2099 de 2021. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=166326

Data Bridge Market Research. (2023). Global commercial drones market analysis and forecast to 2030.

Depcik, C., Cassady, T., Li, X., & Alam, S. (2020). Comparison of lithium-ion batteries, hydrogen fueled combustion engines, and a hydrogen fuel cell in powering a small unmanned aerial vehicle. Energy Conversion and Management, 207, 112514. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112514

Doosan Mobility Innovation. (2023). Hydrogen fuel cell powered drones – DS30. https://www.doosanmobility.com

Erdinc, O., & Uzunoglu, M. (2010). Recent trends in PEM fuel cell-powered hybrid systems. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 14(9), 2874–2884. https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.003

Flores Navarro, C. (2021). Diseño de un dron con pila de hidrógeno para transporte de paquetería (Trabajo de Fin de Máster, Máster Universitario en Ingeniería Aeronáutica). Universitat Politècnica de Catalunya.

Fuel Cells Bulletin. (2015). EnergyOr shows off world's first fuel cell multirotor UAV. Fuel Cells Bulletin, 2015(6), 5–6.

Fuel Cells Bulletin. (2016). Chinese UAV maker MMC flies hydrogen fuel cell drone for 4 h. Fuel Cells Bulletin, 2016(7), 4–5.

Gutiérrez Jodra, L. (2005). El hidrógeno, combustible del futuro. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 99(1), 49–67.

Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2018). Metodología de la investigación (6.ª ed.). McGraw-Hill.

Intelligent Energy. (2024). Hydrogen fuel cell powered unmanned aerial vehicles. https://www.intelligent-energy.com

McNabb, M. (2025). Breaking the limits: How solid-state hydrogen is powering the next generation of UAVs. DroneLife. https://dronelife.com

O'Hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W. G., & Prinz, F. B. (2009). Fuel cell fundamentals. John Wiley & Sons.

Pan, Z., An, L., & Wen, C. (2019). Recent advances in fuel cell-based propulsion systems for unmanned aerial vehicles. Applied Energy, 240, 473–485. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.02.002

Presidencia de la República de Colombia. (2022). Decreto 1476 de 2022. https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=191408

Sharaf, O. Z., & Orhan, M. F. (2014). An overview of fuel cell technology: Fundamentals and applications. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, 810–853. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.012

Shen, Z., Liu, S., Zhu, W., Ren, D., Xu, Q., & Feng, Y. (2024). A review on key technologies and developments of hydrogen fuel cell multi-rotor drones. Energies, 17(16), 4193. https://doi.org/10.3390/en17164193

Spherical Insights. (2023). Drone analytics market size, share and forecast to 2030.

Stroman, R. O., Schuette, M. W., Swider-Lyons, K., Rodgers, J. A., & Edwards, D. J. (2014). Liquid hydrogen fuel system design and demonstration in a small long endurance air vehicle. International Journal of Hydrogen Energy, 39(21), 11279–11290. https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.05.082

Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). (2024). Plan Energético Nacional 2024–2054: Tomo I. Ministerio de Minas y Energía, Colombia. https://docs.upme.gov.co

UAV Latam. (2024). Mercado de drones en América Latina: tendencias y proyecciones.

Universidad de Sevilla. (2025). Integración de pila de combustible de hidrógeno verde en UAV VTOL – Proyecto U5-SPACE.

Vicor Corporation. (2023). Fuel-cell-powered drones use power modules to deliver 4× flight times. https://www.vicorpower.com

Yan, Y. H., Lv, Z. Y., Yuan, J. B., & Chai, J. G. (2019). Analysis of power source of multirotor UAVs. International Journal of Robotics and Automation, 34(4), 563–571.

9. Anexos

Anexo A. *Entrevistas a posibles clientes*

Apéndice A1. *Entrevista al Ingeniero Daniel, quien trabaja prestando el servicio de fumigación de fincas para las fincas que le venden leche a Alquería.*

Contexto: Empresa Alquería Pro, Drops Alquería pro Maps, él está certificado por aeronáutica Civil, Examen RAC 100. Son de los pocos que están certificados y legales ante la operación de los drones, empezaron a operar para enero del 2024, se certificaron en el 2024.

1. Contexto de la finca y operación
    1. ¿Qué cultivos manejan y cuántas hectáreas cubren?
        a. Cultivos de praderas, pastos para ganado, explorar papá, arroz
        b. Han llegado a cubrir hasta 509 hectáreas en 1481 vuelos, al día pueden llegar a hacer 34 hectáreas. Otras empresas pueden llegar a hacer más por variables, altura, velocidad y litros por hectáreas. Ellos aplican 40 litros por hectárea. Otras empresas utilizan 15 a 20 litros por hectárea.
    2. ¿En qué regiones/climas operan (altitud, lluvias, temperatura)?
        a. Sabana de Bogotá, Boyacá y en el Meta.
    3. ¿Qué tareas realizan con drones (fumigación, siembra, monitoreo)?
        a. Fumigación y fertilización.
        b. Con el dron multiespectral DJI 3M utilizan fotogrametría y evaluar los índices de vegetación.
    4. ¿Desde cuándo usan drones en la Empresa?
        a. 1 año y medio. Han tenido 2 accidentes aéreos. T40 por mala práctica, cuando descendió y chocó con un palo, la hélice se amarró a un alambre, no se dañó completamente, pero se demoró la reparación y fue costosa.
        b. Para fumigar 5 hectáreas serían 8 baterías es decir 60 minutos o menos.
    5. ¿Qué modelo utilizan (ej. DJI Agras T30, DJI Agras T40, etc.)?
        a. Para el programa de fumigación T40 Y van a llegar T25p. (el T25 es más pequeño y es más fácil de manejar para los potreros de la sabana)
        b. Cada vuelo puede cargar de 30 litros a 45 litros según la altura mts sobre el nivel del mar. Pero si es fertilización edáfica o granular, es producto en grano y se demora más en esparcir porque son 3 bultos por hectárea. Casi no hace edáfico porque no es tan rentable.
        c. Y el 3M para fotogrametría
    6. ¿Cuántos drones tienen en operación actualmente?
        a. De agricultura T40 uno (80 millones)
        b. De 3M tenían 2 y ahora solo 1 porque les robaron los 2. (valen 30 millones cada uno)

2. Uso diario y rendimiento

7. ¿Cuántas hectáreas cubren por día con el dron?
    a. de 23 a 34 según las condiciones y las variables externas.
8. ¿Cada cuánto utilizan el dron y por cuántas horas operan al día?
    a. Dependiendo de la programación
9. ¿Cuántos vuelos realizan por jornada? Teniendo en parar para cambiar las baterías.
    a. Varía dependiendo de la velocidad, por hectárea 1,2 baterías.
10. ¿Cuál es el tiempo promedio de vuelo por batería?
    a. 8 a 9 minutos. Pero duran menos en zonas más altas, sobre 2500 mts.
11. ¿Cuánto tiempo toma cambiar batería y retomar operación?
    a. Por dron tienen 6 baterías (12 minutos en cargar)

3. Energía y baterías

12. ¿Cuántas baterías usan por dron? 6 por dron
13. ¿Cuánto cuesta cada batería? 10’940.000 cada una
14. ¿Cuántos ciclos de vida les dura una batería? 1500 ciclos
15. ¿Cuánto tiempo tarda la carga completa? 12 minutos
16. ¿Qué tipo de estación de carga usan (ej. DJI Agras Intelligent Battery Station)? Tienen una planta eléctrica de 220v y Hub de carga rápida con 2 cables. Si se carga a 110 v se demora 22 minutos.
17. ¿Usan red eléctrica o generador para recargar los drones? ¿Cuál?
    a. Tienen planta eléctrica con gasolina en la camioneta con platón o estacas.
18. ¿Cuánto gastan en combustible o electricidad por día?
    a. Planta eléctrica es de 10.5 Galones, Por día la cargan full. y Por si se necesita adicional un bidón de 30 litros.
19. ¿Tienen tiempos muertos esperando que carguen las baterías? ¿Cuánto tiempo pierden? En este momento no porque tienen las 6 baterías de respaldo. El tiempo que se demoran es la aplicación y preparación de los productos, fertilizantes, químicos.
20. ¿Cuál es el mayor problema con baterías o energía?
    a. Que tiene que cargarse con 220v y que la planta tenga 11 12kva
    b. ¿Costo de la planta eléctrica? alrededor de 18 millones

4. Logística en campo

21. ¿Cómo transportan el dron, baterías, agua y químicos?
    a. La camioneta y dentro de la camioneta hay un tanque de 250 litros.
22. ¿Cuántas personas se necesitan para operar todo el sistema?
    a. Dos, piloto y asistente. El asistente tiene que ser observador.
23. ¿Qué tan complejo es montar la operación en campo (tiempo y dificultad)?
    a. Se demora 15-20 minutos, usan aplicaciones para revisar KPs (Cargas electromagnéticas), App Dron Buddy, App Windy para vientos y precipitación, Antes hacían los perímetros caminando. Pero si son fincas grandes, se hace el perímetro con Dron.
24. ¿Qué pasa si están en zonas sin electricidad?
    a. En esos casos se debe garantizar la gasolina para la planta eléctrica.
25. ¿Qué limitaciones encuentran en terrenos difíciles o remotos?

a. Cuando son laderas los drones no tienen buenos sensores, radares, y que ajuste la altura.

5. Costos reales
    26. ¿Cuál fue la inversión total inicial (dron + baterías + estación + otros)?
        a. Dron T40 y el M3 110 millones
        b. 9 baterías
        c. Estación de carga viene con el kit del dron
        d. Planta eléctrica alrededor de 18 millones
    27. ¿Cuáles son sus costos operativos diarios aproximados?
        a. Depende de las hectáreas trabajadas.
        b. Las variables serían los operarios (capacitados y certificados), distancias, gasolinas, peajes, número de baterías, seguros de salud y ARL y seguros de robo.
    28. ¿Cuánto cobran/pagan por hectárea fumigada?
        a. Depende es el número de hectáreas - 130 mil por hectárea.
        b. El centro de operaciones es en Cajicá.
    29. ¿En cuánto tiempo recuperaron la inversión?
        a. No se ha recuperado por los accidentes. Tienen asegurados los drones con Zurich.
    30. ¿Cuál es el mayor gasto recurrente hoy con el uso de drones?
        a. La operación, la camioneta es alquilada 24/7 todo el mes. Modelo de renting. Y los operarios. Por ahora 2 por dron y hay 4 certificados para agricultura
        b. Certificaciones con la aeronáutica y DJI da una capacitación muy básica y otras academias hacen el curso para uso específico en agricultura.

6. Problemas y oportunidades
    31. ¿Cuál es el principal cuello de botella en la operación?
        a. Los desplazamientos para llegar a las hectáreas que hay que trabajar.
    32. ¿Qué les gustaría mejorar del sistema actual?
        a. La autonomía de las baterías.
        b. Las luces para el trabajo en la noche.
        c. Protección para las hélices.
    33. ¿Han tenido fallas críticas? ¿Cuáles?
        a. El aterrizaje del dron accidente
        b. Otro accidente, estaban en operación se levantó un plástico en el potrero, se amarró a una de las hélices y se cayó el dron.
    34. ¿Qué tan confiable es el sistema en jornadas largas?
        a. Tuvieron en Puerto Gaitán 15 horas de trabajo y vuelos nocturnos y les fue muy bien.
    35. ¿Qué opinan del tiempo de autonomía actual?
        a. Te gustaría mejorarlo

7. Innovación
    36. Si pudieran duplicar o triplicar el tiempo de vuelo, ¿qué cambiaría en su operación?

    a. Se haría más rápido el trabajo y por lo tanto mayor productividad
37. ¿Les interesaría eliminar el uso de múltiples baterías?
    a. ¡Claro!
38. ¿Qué tan importante es reducir tiempos muertos?
    a. No tienen tantos tiempos muertos por las 6 baterías, pero es también una inversión mucho más alta por dron
39. ¿Aceptarían una tecnología nueva si reduce costos operativos?
    a. Si
40. ¿Qué les preocuparía de usar drones con hidrógeno?
    a. Riesgos con el hidrógeno, la reacción con los productos químicos, la logística de carga y abastecimiento transporte la seguridad.
41. ¿Cuánto estarían dispuestos a pagar para un dron con mayor autonomía de vuelo?
    a. No estarían dispuestos a pagar más de lo que se paga actualmente.

Apéndice A2. *Entrevista a cliente recurrente de drones convencionales*

1. Contexto de la finca y operación
    1. ¿Qué cultivos manejan y cuántas hectáreas cubren?

       2 tipos, 10 hectáreas de plátano y pasto para ganadería 484 hectáreas

    2. ¿En qué regiones/climas operan (altitud, lluvias, temperatura)?

       Honda, 2226 mts

    3. ¿Qué tareas realizan con drones (fumigación, siembra, monitoreo)?

Plátano con fumigación, con foliar y en ganadería fumigación. También en algunos casos se usan fertilizantes y para control de malezas.

4. ¿Desde cuándo usan drones en la finca? Desde enero de 2026
5. ¿Qué modelo utilizan (ej. DJI Agras T30, DJI Agras T40, etc.)? DJI T30
6. ¿Cuántos drones tienen en operación actualmente? Por alquiler por hectárea, mínimo 20 hectáreas, 50 mil pesos la hectárea,

2. Uso diario y rendimiento

7. ¿Cuántas hectáreas cubren por día con el dron?

Cobran 50 hectáreas por día. 2’500.000 el día. 500 hectáreas: de 3 a 3 meses y medio con personas, 3 personas 5 hectáreas diarias.

5 hectáreas 1000 litros de agua, pero con el dron son 50 litros por hectárea.

8. ¿Cada cuánto utilizan el dron y por cuántas horas operan al día?

Se fumiga cada mes y medio a dos meses. Este año llevan 124 hectáreas fumigadas

9. ¿Cuántos vuelos realizan por jornada? Teniendo en cuenta los tiempos para cambiar la batería, según el centro de operación 5-6 sobrevuelos
10. ¿Cuál es el tiempo promedio de vuelo por batería?

Les dura 20-25 minutos. Ya tienen el mapeo de las hectáreas.

11. ¿Cuánto tiempo toma cambiar batería y retomar operación?

Tienen las baterías cargadas en el platón de la camioneta y una planta de Diesel y gasolina. Siempre usan camioneta.

3. Energía y baterías

12. ¿Cuántas baterías usan por dron? 3 bacterias por dron
13. ¿Cuánto cuesta cada batería?
14. ¿Cuántos ciclos de vida les dura una batería?
15. ¿Cuánto tiempo tarda la carga completa?
16. ¿Qué tipo de estación de carga usan (ej. DJI Agras Intelligent Battery Station)?
17. ¿Usan red eléctrica o generador para recargar los drones? ¿Cuál? Diesel o gasolina
18. ¿Cuánto gastan en combustible o electricidad por día?
19. ¿Tienen tiempos muertos esperando que carguen las baterias? ¿Cuánto tiempo pierden? Tienen tiempos muertos mayormente por el clima. No se comporta igual por lluvia y viento
20. ¿Cuál es el mayor problema con baterías o energía?

4. Logística en campo

21. ¿Cómo transportan el dron, baterías, agua y químicos? Camioneta de platón, ahí tienen en donde cargan el dron
22. ¿Cuántas personas se necesitan para operar todo el sistema? El que maneja la camioneta que es un auxiliar y la persona que maneja el dron.
23. ¿Qué tan complejo es montar la operación en campo (tiempo y dificultad)? Según la programación revisan clima, terreno, localización y vías para llegar.
24. ¿Qué pasa si están en zonas sin electricidad?
25. ¿Qué limitaciones encuentran en terrenos difíciles o remotos?

5. Costos reales

26. ¿Cuál fue la inversión total inicial (dron + baterías + estación + otros)?
27. ¿Cuáles son sus costos operativos diarios aproximados?
28. ¿Cuánto cobran/pagan por hectárea fumigada?
29. ¿En cuánto tiempo recuperaron la inversión?
30. ¿Cuál es el mayor gasto recurrente hoy con el uso de drones?

Si les gustaría comprar un dron, pero se suman los costos de mantenimiento y la persona que opera el dron. Cálculos financieros retorno a 1 año y medio. Ellos compran los fertilizantes, los químicos.

6. Problemas y oportunidades
    31. ¿Cuál es el principal cuello de botella en la operación?
    32. ¿Qué les gustaría mejorar del sistema actual?
    33. ¿Han tenido fallas críticas? ¿Cuáles?
    34. ¿Qué tan confiable es el sistema en jornadas largas?
    35. ¿Qué opinan del tiempo de autonomía actual? 15 a 20 minutos.

7. Innovación
    36. Si pudieran duplicar o triplicar el tiempo de vuelo, ¿qué cambiaría en su operación? Si se hacen 50 hectáreas en un día, sería mejorar el tiempo, podría mejorar el tiempo de operación, se podría mejorar la productividad.
    37. ¿Les interesaría eliminar el uso de múltiples baterías?
    38. ¿Qué tan importante es reducir tiempos muertos?
    39. ¿Aceptarían una tecnología nueva si reduce costos operativos?
    40. ¿Qué les preocuparía de usar drones con hidrógeno?
    41. ¿Cuánto estarían dispuestos a pagar para un dron con mayor autonomía de vuelo?

Apéndice A3. *Correo de Contacto para Cotización de los drones con la Empresa Coreana*

Dear Hogreen Company Team,

My name is Viviana Montaño, and I am currently developing a research and business proposal focused on the implementation of hydrogen-powered drones for precision agriculture in Latin America, particularly in Colombia.

We had the pleasure of meeting in 2025 in July at the KEET in Gwangjui.

I am very interested in your technology and would like to better understand both the technical and commercial aspects of your solutions. This information will be essential for evaluating the feasibility of integrating your systems into agricultural operations in our region.

I would greatly appreciate it if you could provide information on the following:

1. Pricing and Components

- What is the price of your hydrogen-powered agricultural drones?
- What components (devices as sensors, camera, etc) are included in the base system?
- What is the cost of hydrogen tanks and their specifications (capacity, weight, autonomy)?
- What is the price of the fumigation system (spraying mechanisms, tanks, nozzles, etc.)?
- What is the cost of the hydrogen generation system (electrolyzer) and its technical specifications?

2. Production and Delivery

- What is your current production capacity (units per month)?
- What are the estimated delivery times after placing an order?
- Do you offer international shipping to Colombia or Latin America?

3. Operation and Training

- Do you provide operator training programs?
- What is the duration and format of the training (online, on-site, hybrid)?
- What level of technical expertise is required to operate the drones system?
- Do you provide maintenance support or technical assistance?

4. Performance and Use in Field Conditions

- What is the average flight time and operational capacity per mission?
- How does the system perform in high-altitude environments (e.g., Andean regions)?
- What are the main operational advantages compared to battery-powered drones?

5. Safety and Regulations

- What safety measures are implemented for hydrogen storage and usage?
- Are there certifications or international standards that your systems comply with?

My goal is to evaluate how this technology could improve efficiency, reduce downtime, and optimize logistics in agricultural operations, particularly in remote areas where energy access is limited.

I would also be very interested in scheduling a meeting or call to further discuss potential collaboration opportunities.

Thank you very much for your time and support. I look forward to your response.

Kind regards,
Viviana Montaño

Anexo B. *Construcción de la población y la muestra.*

Tabla B1.

Encuesta nacional agropecuaria, (2025)

	UPA	Cve
Total 27 departamentos	**1.970.575**	**2,8**
Total, Región Andina	**1.209.769**	**3,2**
Antioquia	136.999	12,2
Boyacá	378.283	3,9
Caldas	34.069	11,6
Cundinamarca	242.251	7,2
Huila	99.508	23,6
Norte de Santander	55.540	9,2
Quindío	10.440	9,0
Risaralda	29.110	7,3
Santander	108.483	7,4
Tolima	115.085	7,4

*se descarta el Huila por tener un Cve alto.

Tabla B2.

UPAs mayores o igual a 5 hectáreas

	De 5 a < 10 Hec	De 10 a < 50 Hec	De 50 a < 100 Hec	De 500 a < 1.000 Hec	De 1.000 y más Hec
	UPA	UPA	UPA	UPA	UPA
Total, Región Andina	**171.977**	**205.968**	**31.089**	**1.215**	**322**
Antioquia	21.782	37.113	4.881	502	77
Boyacá	34.289	31.847	2.965	79	26
Caldas	6.241	5.868	895	11	14
Cundinamarca	27.914	29.971	3.659	74	15
Norte de Santander	10.837	23.417	4.918	31	7
Quindío	2.261	2.929	332	3	4
Risaralda	4.716	2.927	134	2	8
Santander	26.835	35.175	6.554	413	134
Tolima	24.129	23.021	4.465	37	34

Tabla B3

Construcción del TAM-SAM-SOM

	Total, Región Andina	1.110.260
HECTAREAS	UPA 5 a < 10	159.004
	UPA 10 a < 50	192.270
	UPA 50 a < 100	28.804
	UPA 100 a < 500	21.232
	UPA 500 a < 1000	1.152
	UPA > 1000	319
	Total, Población	402.780
	cantidad de encuestas	382
TAM	Segun el DANE el 16% tiene	64.445
	Le interesa al 53% según encuesta	34155,85
SAM	Solo el 51% compraría drones	17419,4835
SOM	1% Escenario conservador	174,194835

Anexo C. *Cuestionario de recolección de datos*

Apéndice C1. Cuestionario de recolección de datos

¿Cuál es su rol en el sector agrícola?

¿Qué tipo de actividad desarrolla principalmente?

¿Cuántas hectáreas administra aproximadamente?

¿Actualmente utiliza drones en sus operaciones?

¿Para qué actividad considera más útil un dron?

¿Cuál es la principal dificultad actual en su operación?

¿Qué mejora sería más valiosa en una solución con drones?

¿Qué tan interesado estaría en contratar un servicio avanzado con drones?

¿Cómo preferiría acceder a esta solución?

¿Con qué frecuencia lo utilizaría?

¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por una jornada de servicio con dron?

¿Cuánto estaría dispuesto a pagar por un Dron de precisión para agricultura, pero con una autonomía de vuelo de 4 a 8 horas?

Apéndice C2 *Resultados gráficos por pregunta del cuestionario*

Figura C1

Distribución de respuestas para la Pregunta 1

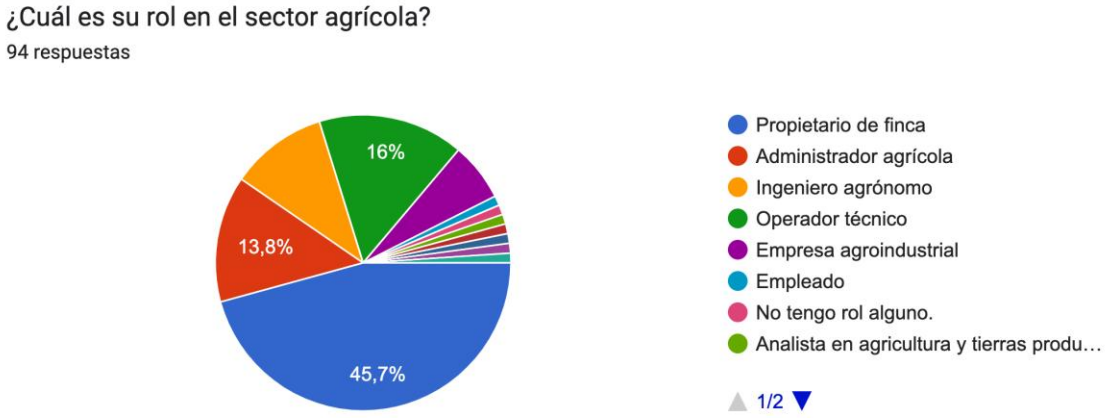


Figura C2

Distribución de respuestas para la Pregunta 2

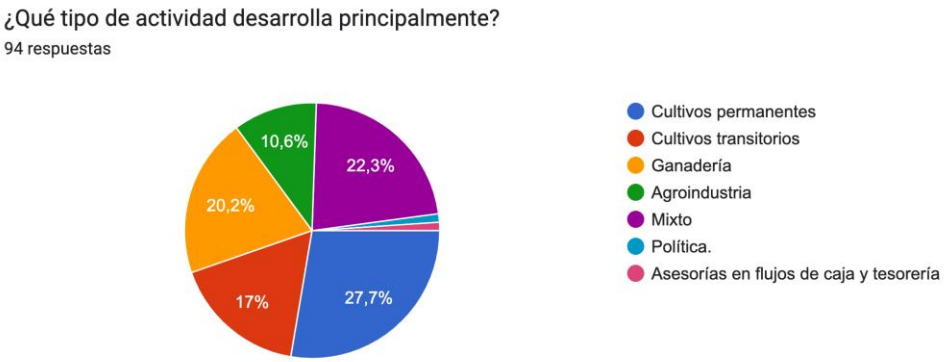


Figura C3

Distribución de respuestas para la Pregunta 3

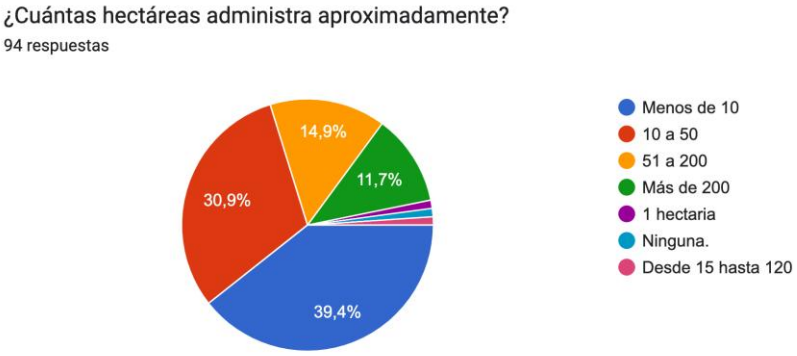


Figura C4

Distribución de respuestas para la Pregunta 4

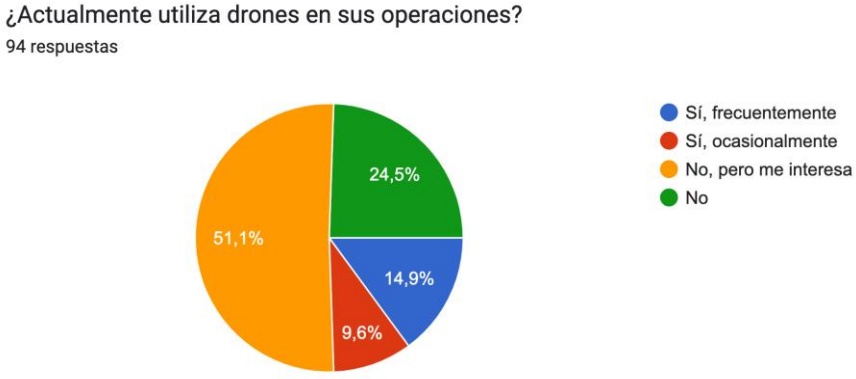


Figura C5

Distribución de respuestas para la Pregunta 5

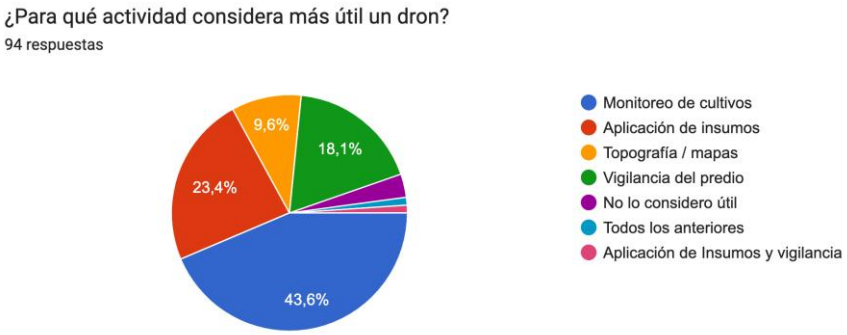


Figura C6

Distribución de respuestas para la Pregunta 6

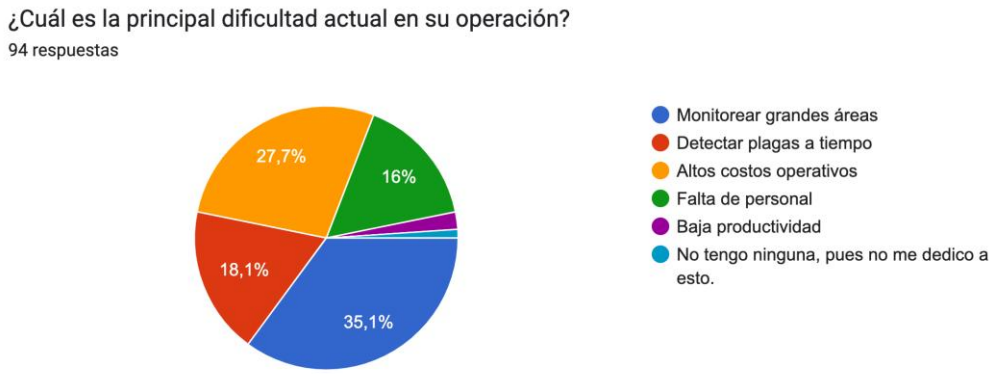


Figura C7

Distribución de respuestas para la Pregunta 7

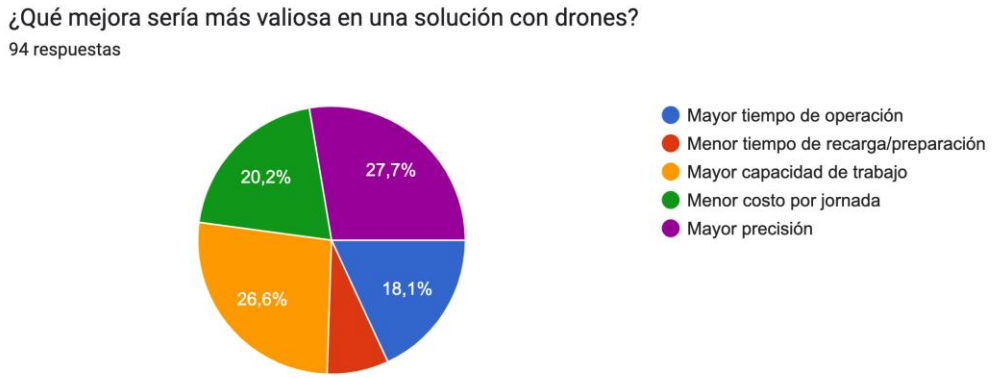


Figura C8

Distribución de respuestas para la Pregunta 8

Figura C9

Distribución de respuestas para la Pregunta 9

Figura C10

Distribución de respuestas para la Pregunta 10

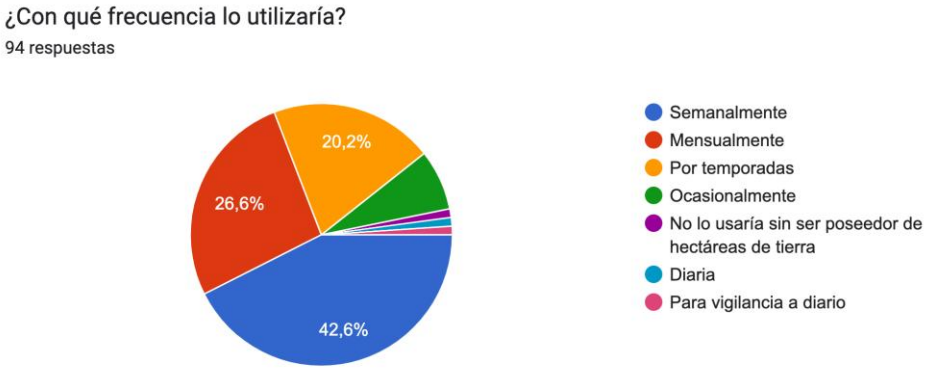


Figura C11

Distribución de respuestas para la Pregunta 11

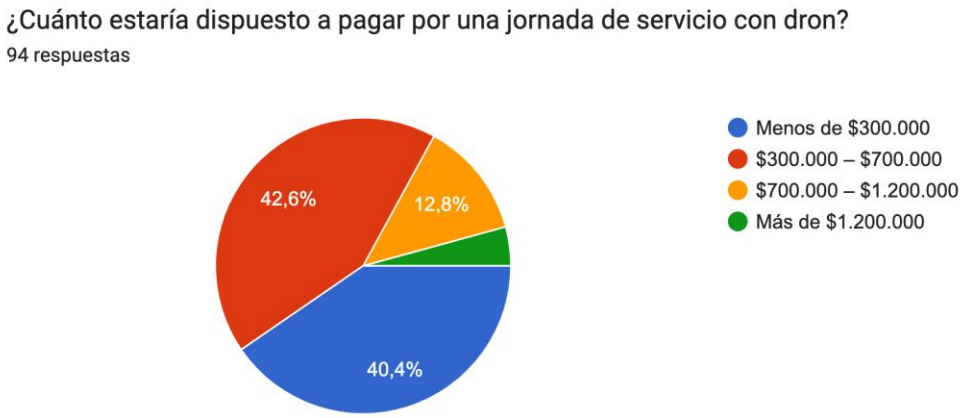
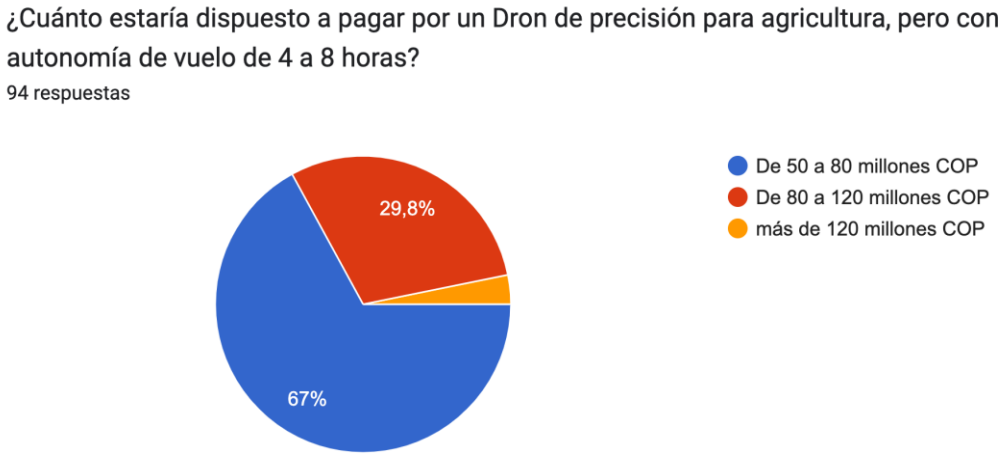


Figura C12

Distribución de respuestas para la Pregunta 12



Apéndice C3. *Matriz de datos y respuestas de la encuesta*

El registro completo de las respuestas obtenidas de la encuesta se encuentra en la hoja de cálculos utilizada para el procesamiento de las variables, se encuentra disponible para su consulta y auditoría científica en el siguiente enlace de acceso abierto:
https://docs.google.com/spreadsheets/d/15HqVT75oBUiQgPpodDzYeahjaooPYP-MDcPWQXLj3sQ/edit?usp=sharing

Anexo D. *simulador financiero institucional*

Apéndice D1. *Enlace simulador financiero*

El registro del simulador financiero se encuentra en la hoja de cálculos utilizada para medir distintos indicadores financieros; Se encuentra disponible para la consulta mediante el siguiente enlace. Simulador Financiero 2026 1.xlsx

Anexo E. *Presentación en Canvas del Modelo de Negocio*

Apéndice E1. *Enlace Presentación*

En este enlace se puede encontrar la presentación utilizada para la sustentación de este trabajo. *Presentación*