

Estudio del Uso de Drones Para la Detección Temprana de Fugas de Metano (CH<sub>4</sub>) en el Proceso de Exploración y Explotación de Hidrocarburos, Mitigando el Impacto Ambiental y Contribuyendo a la Obtención de Beneficios Tributarios

Jenifer Carolina Rojas Rodríguez

Trabajo de Grado para Optar a el Título de Ingeniera de Petróleos

Director

Wilson Raul Carreño Velasco

Máster en Diseño, Gestión y Dirección de proyectos

Codirector

German David Ariza Jerez

Ingeniero de petróleos

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingeniería Físicoquímicas

Escuela de Ingeniería de Petróleos

Bucaramanga

2026

### **Dedicatoria**

A mi familia, quienes con su ejemplo me enseñaron que la persistencia es la única vía al éxito; gracias por recordarme que la constancia siempre permite alcanzar la meta.

A todo el equipo PPU, y en especial a la Coordinación de Subsuelo Putumayo (CSP), quienes durante mis prácticas profesionales me brindaron una guía excepcional cuando más lo necesité. Su mentoría y confianza no solo me permitieron redescubrir la pasión por mi profesión, sino que me demostraron el verdadero propósito y alcance de mi labor como ingeniera.

### **Agradecimientos**

Agradezco profundamente a los ingenieros Wilson Raul Carreño Velasco y Germán David Ariza Jerez, por su dirección constante y compartir sus conocimientos expertos en pro de mi formación profesional y la culminación exitosa de este proyecto.

**Tabla de contenido**

Introducción .....	17
1. Objetivos.....	18
1.1. Objetivo General.....	18
1.2. Objetivos Específicos.....	18
2. Marco Normativo Aplicable a la Detección de Fugas de Gas Metano (CH <sub>4</sub> ) Con Drones .....	19
2.1. Reglamentación sobre el Uso de Drones en Colombia.....	19
2.2. Beneficios Tributarios Asociados a Tecnologías Limpias y Reducción en Emisiones de Gas Metano (CH <sub>4</sub> ).....	28
3. Eficiencia e Impacto Ambiental de los Drones en la Detección de Fugas de Gas Metano (CH <sub>4</sub> ) .....	40
3.1. Métodos Tradicionales de Detección de Fugas .....	40
3.1.1. Inspección con Cámaras FLIR Manuales .....	40
3.1.2. Sensores Portátiles de Gas .....	42
3.1.3. Sensores Fijos Instalados en Infraestructura.....	43
3.1.4. Inspección Visual.....	44
3.2. Uso de Drones en la Detección de Fugas de Gas.....	46
3.2.1. Espectroscopía de Absorción Láser de Diodo Sintonizable (TDLAS).....	47
3.2.2. Imagen Óptica de Gases (OGI).....	49
3.2.3. Sensores de Ultrasonido.....	51
3.3. Matriz de Evaluación Técnica de Sensores .....	54
3.4. Criterios de Selección Tecnológica .....	57
3.5. Alcance y Limitaciones del Análisis.....	59

4. Análisis Técnico–Económico y Tributario del Uso de Sistemas UAV Para Detección de Gas Metano CH <sub>4</sub> .....	59
4.1. Diseño Metodológico del Análisis.....	60
4.2. Proyección del IPC .....	61
4.3. Determinación del Sistema Tecnológico Óptimo .....	64
4.3. Aplicación de Beneficios Tributarios y Análisis del Impacto Económico .....	66
4.3.1. Estimación de la Inversión Inicial.....	68
5. Resultados.....	70
6. Conclusiones.....	72
7. Recomendaciones .....	74
Referencias Bibliográficas .....	75
Apéndices.....	86

**Lista de Tablas**

<b>Tabla 1</b> Especificaciones de calidad del gas natural .....	29
<b>Tabla 2</b> Potenciales de reducción del consumo de energía y emisiones por sectores.....	32
<b>Tabla 3</b> Medidas de eficiencia energética analizadas para el sector hidrocarburos .....	34
<b>Tabla 4</b> Resumen de resultados de las medidas de eficiencia energética propuestas para el sector hidrocarburos .....	35
<b>Tabla 5</b> Ventajas y desventajas de la inspección con cámaras FLIR OGI manuales.....	41
<b>Tabla 6</b> Ventajas y desventajas de los sensores portátiles de gas .....	42
<b>Tabla 7</b> Ventajas y desventajas de sensores fijos instalados en infraestructura.....	43
<b>Tabla 8</b> Ventajas y desventajas de la inspección visual.....	44
<b>Tabla 9</b> Comparación de métodos tradicionales para la detección de fugas de gas metano (CH <sub>4</sub> ) .....	45
<b>Tabla 10</b> Ventajas y desventajas de la espectroscopía de absorción láser de diodo sintonizable (TDLAS).....	49
<b>Tabla 11</b> Ventajas y desventajas de Imagen Óptica de Gases (OGI).....	50
<b>Tabla 12</b> Ventajas y desventajas de sensores de ultrasonido .....	52
<b>Tabla 13</b> Comparación técnica de sensores usados en drones para detección de metano .....	53
<b>Tabla 14</b> Criterios considerados para calificar la precisión .....	55
<b>Tabla 15</b> Matriz de desempeño técnico comparativo por sensor .....	55
<b>Tabla 16</b> Comparación de indicadores clave entre métodos tradicionales y UAS para detección de fugas de CH <sub>4</sub> .....	56
<b>Tabla 17</b> Matriz de selección de sensores según escenario operacional .....	58
<b>Tabla 18</b> Proyección IPC para 5 años (2025-2030).....	63

<b>Tabla 19</b> Comparación técnica de plataformas evaluadas .....	65
<b>Tabla 20</b> Estimación de la inversión inicial .....	68
<b>Tabla 21</b> Estimación del valor de salvamento y base depreciable .....	70
<b>Tabla 22</b> Ahorro económico mediante aplicación de beneficios tributarios.....	71
<b>Tabla 23</b> Ahorro total por depreciación acelerada del activo OGI + Dron multirrotor .....	71
<b>Tabla 24</b> Ahorro total por depreciación acelerada del activo TDLAS + Dron multirrotor .....	72
<b>Tabla A1</b> Datos históricos del Índice de Precios al Consumidor (IPC) en Colombia (1995-2025) .....	86
<b>Tabla A2</b> Resultados de la proyección del IPC (1995-2041).....	87
<b>Tabla B1</b> Especificaciones técnicas – DJI FlyCart 30 .....	90
<b>Tabla B2</b> Especificaciones técnicas – DJI Matrice 350 RTK.....	91
<b>Tabla B3</b> Especificaciones técnicas – FLIR GF77 .....	92
<b>Tabla B4</b> Especificaciones técnicas – Falcon LMD .....	93
<b>Tabla B5</b> Especificaciones técnicas – Gremsy H16.....	94
<b>Tabla B6</b> Especificaciones técnicas – Placa de amortiguación (Damping Plate).....	94
<b>Tabla B7</b> Especificaciones técnicas – Adaptador CNC.....	95
<b>Tabla B8</b> Especificaciones técnicas – Adaptador Quick Release .....	95
<b>Tabla B9</b> Cálculo Payload – Configuración DJI Matrice 350 RTK + OGI FLIR GF77 + Gremsy H16.....	96
<b>Tabla B10</b> Cálculo Payload – Configuración DJI Matrice 350 RTK + OGI FLIR GF77 + Gremsy T7 .....	97

<b>Tabla B11</b> Cálculo Payload – Configuración DJI FlyCart 30 + OGI FLIR GF77 + Gremsy H16 .....	97
<b>Tabla B12</b> Cálculo Payload – Configuración DJI Matrice 350 RTK + LMD Falcon .....	98
<b>Tabla C1</b> Estimación de inversión inicial del sistema OGI + Dron multirrotor .....	99
<b>Tabla C2</b> Estimación de inversión inicial del sistema TDLAS + Dron multirrotor .....	100
<b>Tabla C3</b> Aplicación de beneficios tributarios sobre el sistema OGI (2026 - 2034).....	101
<b>Tabla C4</b> Aplicación de beneficios tributarios sobre el sistema OGI (2035 - 2041).....	102
<b>Tabla C5</b> Aplicación de beneficios tributarios sobre el sistema TDLAS (2026 - 2034).....	103
<b>Tabla C6</b> Aplicación de beneficios tributarios sobre el sistema TDLAS (2035 - 2041).....	104

**Lista de Figuras**

<b>Figura 1</b> Sensor Laser Methane mini - TDLAS.....	48
<b>Figura 2</b> Cámara FLIR GF320 - OGI .....	50
<b>Figura 3</b> Sensor ultrasónico FT742-SM.....	52
<b>Figura 4</b> Ubicación típica de sensores en un dron multirroto para la detección de gas metano. 54	
<b>Figura 5</b> Proyección del IPC bajo modelo Holt sin estacionalidad (1995-4041) .....	64

**Lista de Apéndices**

Apéndice A Proyección del IPC Mediante Modelo Holt (15 Años) Sin Estacionalidad .....	86
Apéndice B Especificaciones Técnicas y Cálculos de Payload.....	90
Apéndice C Modelo Tributario-Financiero del Proyecto .....	99

## Glosario

**Absorción Infrarroja:** Fenómeno físico donde las moléculas de gas (como el metano) absorben energía en longitudes de onda específicas, permitiendo su detección mediante sensores ópticos.

**Aerocivil / UAEAC:** Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. Autoridad responsable de regular y supervisar la aviación civil en Colombia.

**Aprovechamiento de gas:** Proceso de captura y uso productivo del gas natural asociado que, de otro modo, sería venteado o quemado.

**CAPEX (Capital Expenditure):** Inversión inicial o de capital requerida para la adquisición de los sistemas UAS y sensores.

**Carga útil (Payload):** Capacidad máxima de peso adicional que un dron puede transportar manteniendo sus parámetros de seguridad.

**CH<sub>4</sub>:** Metano. Gas de efecto invernadero con alto potencial de calentamiento global, objetivo principal de detección en este estudio.

**CMNUCC / UNFCCC:** Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático.

**COVs:** Compuestos Orgánicos Volátiles.

**CREG:** Comisión de Regulación de Energía y Gas.

**DANE:** Departamento Administrativo Nacional de Estadística.

**Depreciación acelerada:** Incentivo fiscal que permite reconocer el desgaste de un activo en un tiempo menor al ordinario, optimizando el flujo de caja.

**DIAN:** Dirección de Impuestos y Aduanas Nacionales de Colombia.

**DSNA:** Dirección de Servicios para la Navegación Aérea.

**Emisiones fugitivas:** Liberaciones no intencionales de gas a través de sellos, válvulas o fallas en la infraestructura.

**Error relativo:** Cociente entre el error absoluto y el valor real, utilizado para medir la precisión de los sensores en vuelo.

**Espectroscopía:** Técnica analítica que estudia la interacción entre la radiación electromagnética y la materia para cuantificar concentraciones de gas.

**FLIR (Forward Looking Infrared):** Tecnología de infrarrojo de barrido frontal.

**GEE (Gestión Eficiente de Energía):** No confundir con GEI (Gases de Efecto Invernadero).

**Gimbal:** Soporte motorizado y estabilizado que mantiene la orientación fija de los sensores independientemente del movimiento del dron.

**GWP (Global Warming Potential):** Medida de cuánto calor atrapa un gas en la atmósfera en comparación con el CO<sub>2</sub>.

**Heavy-lift:** Categoría de drones diseñados para transportar cargas pesadas (como el sistema OGI completo).

**Inversión Efectiva:** Costo neto real tras aplicar ahorros por beneficios tributarios y descuentos de ley.

**IPC:** Índice de Precios al Consumidor.

**Latencia:** Tiempo de retraso entre la detección física del gas y la visualización de la lectura en la estación de control.

**LMD (Laser Methane Detector):** Detector de metano por láser.

**Lmm:** *Laser Methane mini*. Modelo específico de sensor compacto TDLAS.

**Matriz cualitativa:** Herramienta de análisis para clasificar sensores basados en atributos (Alto, Medio, Bajo).

**Modelo de Holt:** Método de pronóstico estadístico para predecir valores futuros con tendencia (aplicado al IPC).

**MOx:** Sensores de Óxido Metálico.

**MTOW (Maximum Take-Off Weight):** Peso máximo permitido para que una aeronave despegue de manera segura.

**NDC:** Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional ante la CMNUCC.

**OGI (Optical Gas Imaging):** Imagen Óptica de Gases. Tecnología que permite visualizar nubes de gas en tiempo real.

**PAI-PROURE:** Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía.

**Pluma de dispersión:** Geometría y dirección que toma el gas al liberarse bajo condiciones de viento y presión.

**RAC:** Reglamentos Aeronáuticos de Colombia.

**Renta Líquida Gravable:** Base sobre la cual se aplica la tarifa del impuesto de renta tras deducciones y depreciaciones.

**Ruido Aerodinámico:** Interferencia acústica generada por el flujo de aire en las hélices, que limita el uso de sensores ultrasónicos.

**RUT:** Reglamento Único de Transporte de Gas Natural.

**SCADA:** Control de Supervisión y Adquisición de Datos.

**SMS (Safety Management System):** Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional aeronáutica.

**SSE:** Suma de Cuadrados del Error (parámetro de ajuste del modelo de Holt).

**SSOAC:** Secretaría de Seguridad Operacional y de la Aviación Civil.

**TDLAS:** Espectroscopía de Absorción Láser de Diodo Sintonizable.

**Transición Energética:** Proceso de descarbonización y cambio hacia fuentes de energía más limpias.

**TRM:** Tasa Representativa del Mercado.

**UA / UAS:** Aeronave No Tripulada / Sistema de Aeronave No Tripulada.

**UPME:** Unidad de Planeación Minero Energética.

**USEPA:** Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos.

**Venteo:** Liberación controlada y directa de gas natural a la atmósfera.

**VHF:** Banda de frecuencia utilizada en comunicaciones aeronáuticas.

**VLOS (Visual Line of Sight):** Operación en la que el piloto mantiene contacto visual directo con el dron.

## Resumen

**Título:** Estudio del uso de drones para la detección temprana de fugas de metano (CH<sub>4</sub>) en el proceso de exploración y explotación de hidrocarburos, mitigando el impacto ambiental y contribuyendo a la obtención de beneficios tributarios\*

**Autor:** Jenifer Carolina Rojas Rodríguez\*\*

**Palabras Clave:** Metano (CH<sub>4</sub>), Drones (UAS), Fugas, Incentivos tributarios, Eficiencia energética.

**Descripción:** Este proyecto examina la viabilidad técnico-económica y tributaria de hacer uso de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) que cuenten con sensores especializados para la identificación temprana de fugas de gas metano (CH<sub>4</sub>) en el sector petrolero colombiano. La metodología se basó en un análisis comparativo de parámetros técnicos entre sistemas UAS y métodos tradicionales, el cual fue complementado con una valoración de los incentivos fiscales existentes bajo las Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021. Los hallazgos sugieren que la incorporación de sensores de espectroscopia de absorción láser (TDLAS) y termografía infrarroja (OGI) favorecen la eficiencia operacional, optimiza los tiempos de respuesta y logra niveles competitivos de sensibilidad en comparación con los métodos convencionales. En el ámbito financiero, se logró determinar que los beneficios tributarios funcionan como un importante catalizador para la inversión. Se concluye que esta integración tecnológica ayuda a cumplir con la Resolución 40066 y la normativa RAC 91, lo que representa una estrategia factible para influir en la descarbonización del sector energético. Así, el uso de UAS y sensores especializados se perfila como una solución eficiente para alinear los objetivos nacionales de reducción de la huella de carbono con la rentabilidad de las empresas del sector.

---

\* Trabajo de Grado

\*\* Facultad de ingenierías fisicoquímica. Escuela de ingeniería de petróleos. Director: Wilson Raul Carreño Velasco. Máster en diseño, gestión y dirección de proyectos. Codirector: German David Ariza Jerez. Ingeniero de petróleos.

### Abstract

**Title:** Study on the use of drones for early methane (CH<sub>4</sub>) leak detection in the hydrocarbon exploration and production process, mitigating environmental impact and contributing to the procurement of tax benefits\*

**Author:** Jenifer Carolina Rojas Rodríguez

**Key Words:** Methane (CH<sub>4</sub>), Drones (UAS), Leaks, Tax incentives, Energy efficiency\*\*

**Description:** This project evaluates the technical-economic and tax feasibility of implementing Unmanned Aircraft Systems (UAS) equipped with specialized sensors for early methane (CH<sub>4</sub>) leak detection within the Colombian oil sector. The methodology was based on a comparative analysis of technical parameters between UAS and conventional methods, coupled with an evaluation of current fiscal incentives under Laws 1715 of 2014 and 2099 of 2021. Results suggest that the integration of Tunable Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) and Optical Gas Imaging (OGI) sensors favors operational efficiency, optimizes response times, and achieves competitive sensitivity levels compared to traditional techniques. Financially, it was determined that tax benefits act as a relevant catalyst for investment. The study concludes that this technological integration contributes to the compliance framework of Resolution 40066 and RAC 91 aviation regulations, representing a viable strategy for industrial decarbonization. Thus, the use of UAS and specialized sensors emerges as a high-efficiency solution to align corporate profitability with national goals for carbon footprint reduction and energy transition.

---

\* Degree Work

\*\* Faculty of physico-chemical engineering. School of petroleum engineering. Advisor: Wilson Raul Carreño Velasco. Master in project design, management, and direction. Co-advisor: German David Ariza Jerez. Petroleum engineer.

## Introducción

Uno de los mayores desafíos globales es el cambio climático, lo cual ha llevado a los gobiernos e industrias a adoptar tácticas para reducir la emisión de gases de efecto invernadero. De acuerdo con este compromiso, el estado colombiano se ha propuesto reducir sus emisiones en un 51% para 2030, conforme a las contribuciones determinadas a nivel nacional (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2020). En este contexto, el sector de hidrocarburos juega un papel fundamental, dado que el gas metano (CH<sub>4</sub>) posee un potencial de calentamiento global significativamente superior al del dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en el corto plazo.

Para cumplir estos objetivos, es importante detectar y mitigar las fugas de CH<sub>4</sub> con la mayor prontitud posible. Los métodos tradicionales de inspección han evidenciado limitaciones en tiempos de reacción operativa y cobertura en zonas de difícil acceso. Como respuesta, se plantea la integración de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS, por sus siglas en inglés) equipadas con sensores especializados como una alternativa para optimizar la detección de manera ágil y precisa.

El presente estudio tiene como objetivo determinar la viabilidad económica, técnica y ambiental del uso de UAS para identificar fugas tempranas de CH<sub>4</sub> en la industria de hidrocarburos en colombiana. El análisis se estructura a partir del estudio del marco jurídico relacionado con la operación de UAS y la gestión de emisiones. De igual manera, se lleva a cabo un análisis comparativo bajo criterios técnicos específicos entre los métodos convencionales y las tecnologías emergentes (TDLAS y OGI). Finalmente, mediante una evaluación de costos y beneficios, se examina como el uso de estas herramientas podría mejorar la eficiencia operativa y permite el acceso a incentivos fiscales, alineando la rentabilidad empresarial con las metas nacionales de transición energética.

## 1. Objetivos

### 1.1. Objetivo General

Evaluar la viabilidad técnico-económica y tributaria del uso de sistemas UAS equipados con sensores especializados para la detección temprana de fugas de metano (CH<sub>4</sub>) en el sector de hidrocarburos, con el fin de favorecer la reducción de emisiones contaminantes, optimizar la eficiencia operativa e identificar el acceso a beneficios tributarios.

### 1.2. Objetivos Específicos

- Reconocer la reglamentación y regulación vigente en Colombia aplicable a la identificación de fugas de gas metano, gestión eficiente de los recursos energéticos y drones.
- Analizar teóricamente la eficiencia operacional y el impacto ambiental asociado al uso de UAS con sensores especializados para la detección de fugas de gas metano (CH<sub>4</sub>), en contraste con los métodos convencionales de monitoreo.
- Ejecutar un análisis financiero y tributario para evaluar la viabilidad y los beneficios económicos a los cuales podrán acceder las empresas que implementen dicha tecnología.

## **2. Marco Normativo Aplicable a la Detección de Fugas de Gas Metano (CH<sub>4</sub>) Con Drones**

La detección de emisiones por fugas de gas metano CH<sub>4</sub> en la industria de hidrocarburos incluye elementos técnicos y financieros, lo que requiere examinar el marco normativo colombiano. El uso de drones y sensores especializados deben ajustarse a las normas en materia de seguridad industrial, medioambiental y regulaciones aeronáuticas. En este capítulo se examinará la normativa vigente, así como los incentivos fiscales destinados a la mejora de la eficiencia operativa y reducir el impacto de las emisiones que contribuyen a la huella de carbono.

### **2.1. Reglamentación sobre el Uso de Drones en Colombia**

El uso de drones o sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) ha experimentado un crecimiento significativo en diversas industrias, principalmente debido a sus ventajas en términos de eficiencia, reducción de costos y acceso a zonas de difícil acceso. En el sector de hidrocarburos, el uso de drones equipados con sensores especializados para la detección temprana de fugas de gas metano se presenta como una alternativa tecnológica innovadora que mejora la seguridad operativa y el monitoreo ambiental.

Sin embargo, al tratarse de una tecnología con implicaciones en seguridad aérea, privacidad y operación en infraestructuras estratégicas, su uso está sujeto a estrictas regulaciones. En Colombia, la Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil (Aerocivil) es la entidad encargada de establecer las normativas que regulan la operación de drones en el espacio aéreo nacional, asegurando que su uso cumpla con los estándares de seguridad y eficiencia.

Por este motivo resulta importante que las empresas interesadas en implementar drones en actividades industriales como la detección de fugas de gas metano, cumplan con los requisitos técnicos y operativos estipulados. A continuación, se detallan las principales regulaciones

aplicables al uso de drones en Colombia, con especial énfasis en aquellas que impactan su uso en la industria de hidrocarburos.

Ley 99 de 1993: “Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el sector público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental (SINA), y se dictan otras disposiciones” (Ley 99 de 1993).

En su Artículo 5°, la ley establece las funciones que corresponden al Ministerio del Medio Ambiente:

... 32) Establecer mecanismos de concertación con el sector privado para ajustar las actividades de éste a las metas ambientales previstas por el Gobierno; definir los casos en que haya lugar a la celebración de convenios para la ejecución de planes de cumplimiento con empresas públicas o privadas para ajustar tecnologías y mitigar o eliminar factores contaminantes y fijar las reglas para el cumplimiento de los compromisos derivados de dichos convenios. Promover la formulación de planes de reconversión industrial ligados a la implantación de tecnologías ambientales sanas y a la realización de actividades de descontaminación, de reciclaje y de reutilización de residuos... (Ley 99 de 1993).

Aunque la regulación aeronáutica define los lineamientos técnicos y operacionales para la operación de UAS en Colombia, su aplicación en actividades industriales, como la detección de fugas de gas metano, también conlleva el manejo potencial de datos sensibles. Aunque el objetivo principal de estas operaciones no es la recolección de información personal, es posible que, en determinadas circunstancias, la tecnología utilizada registre imágenes o videos de personas, propiedades privadas o instalaciones restringidas.

En consecuencia, la operación técnica se rige por los principios de la Ley Estatutaria 1581 del 17 de octubre de 2012, emitida por el Congreso de la República de Colombia, la cual regula el tratamiento de datos personales en el país.

Uno de los fundamentos es el principio de finalidad, el cual establece que: “El tratamiento debe obedecer a una finalidad legítima de acuerdo con la constitución y la ley, la cual debe ser informada al titular” (Ley 1581 de 2012).

Este principio afirma que la información personal obtenida accidentalmente empleando el uso de drones debe restringirse exclusivamente a las finalidades declaradas, como el control ambiental o la seguridad operativa, evitando así usos no permitidos.

El principio de transparencia determina el deber de asegurar a los propietarios el acceso a la información relacionada a sus datos personales de manera clara y oportuna, tal como se menciona: “Principio de transparencia: En el tratamiento debe garantizarse el derecho del titular a obtener del responsable del tratamiento o del encargado del tratamiento, en cualquier momento y sin restricciones, información acerca de la existencia de datos que le conciernan” (Ley 1581 de 2012).

El principio de acceso y circulación restringida, que establece restricciones al acceso y divulgación de la información personal adquirida y almacenada. Dicha ley dispone:

Principio de acceso y circulación restringida: El tratamiento se sujeta a los límites que se derivan de la naturaleza de los datos personales, de las disposiciones de la presente ley y la Constitución. [...] Los datos personales, salvo la información pública, no podrán estar disponibles en internet u otros medios de divulgación o comunicación masiva, salvo que el acceso sea técnicamente controlable para brindar un conocimiento restringido sólo a

los Titulares o terceros autorizados conforme a la presente ley.  
(Ley 1581 de 2012)

Finalmente, el principio de seguridad dicta que las compañías deben implementar acciones técnicas, humanas y administrativas para cuidar la información de accesos no autorizados o su manejo interno inadecuado. La Ley indica:

Principio de seguridad: La información sujeta a tratamiento por el responsable del tratamiento o encargado del tratamiento a que se refiere la presente ley, se deberá manejar con las medidas técnicas, humanas y administrativas que sean necesarias para otorgar seguridad a los registros evitando su adulteración, pérdida, consulta, uso o acceso no autorizado o fraudulento. (Ley 1581 de 2012)

Una de las normativas que regula la operación de drones en Colombia es la Resolución 04201 de 2018, la cual establece las directrices para el funcionamiento de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) dentro del espacio aéreo colombiano. Esta resolución permite establecer las condiciones operativas, la categorización del riesgo de las misiones aéreas y los permisos exigidos para operar en ambientes industriales, como la infraestructura de hidrocarburos.

El Artículo Primero de dicha resolución incorpora un apéndice a la norma RAC 91 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia, titulado “Operación de sistemas de aeronaves no tripuladas – UAS”, dictando que:

“Los requisitos de operación de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) con peso (masa) máximo al despegue (MTOW) superior a 250 gr, usados en actividades civiles, cualquiera que sea el propósito de utilización, que se efectúen dentro del espacio aéreo en el cual tenga jurisdicción el Estado colombiano ...” (Resolución 04201 de 2018, art. 1).

Este fragmento resalta que toda operación con drones de más de 250 gramos debe acatar con cierta normativa específica, siendo especialmente importante para las actividades industriales como el monitoreo de emisiones de CH<sub>4</sub>.

Posteriormente, la resolución determina la categorización de las actividades de las UAS en función del nivel de riesgo operativo:

- (a) Clase A (abierta). Corresponde a la operación de UAS [...] que no requieren de autorización de la UAEAC, dado que su operación representa un mínimo riesgo. [...]
- (b) Clase B (regulada). Corresponde a la operación de UAS que [...] requerirán siempre de autorización de la UAEAC, aun cuando su operación podría implicar un muy bajo riesgo. (Resolución 04201 de 2018)

Esta categorización permite establecer si un proyecto industrial de monitoreo de CH<sub>4</sub> requiere autorizaciones especiales, en función de las propiedades del dron y la operación a realizar.

La legislación también establece con exactitud la comunicación de incidentes y accidentes, definiendo que: “El explotador, propietario, operador o quien manipule los controles de vuelo de un UAS deberá reportar a la SSOAC cualquier evento durante la operación del aparato por el cual: (1) Se causen lesiones a personas o daños a propiedad en la superficie; (2) Colisione con otra UA; (3) Colisione contra cualquier elemento de la infraestructura crítica del país [...]” (Resolución 04201 de 2018).

Estas responsabilidades de registro son importantes para asegurar el monitoreo y seguridad de las operaciones de UAS en áreas críticas.

Asimismo, la Resolución 04201 de 2018 establece un sistema de sanciones para las operaciones que incumplan las normas, indicando que: “Cualquier operación de UAS en

violación de las disposiciones previstas en este Apéndice o cualquiera otra norma de los RAC [...] constituirá infracción sancionable de conformidad con el Régimen Sancionatorio contenido en la norma RAC 13 de los Reglamentos Aeronáuticos de Colombia [...] sin perjuicio de la responsabilidad civil, penal o policiva que pudiera derivarse de la actividad realizada” (Resolución 04201 de 2018).

Igualmente, se determina que: “Las autoridades de control y/o de policía podrán interceptar e inutilizar los UAS mediante el uso de contramedidas electrónicas u otros mecanismos que considere útiles para este propósito” (Resolución 04201 de 2018).

Estas acciones evidencian la rigurosidad con que se controla el funcionamiento de drones en Colombia, especialmente en escenarios de alto riesgo como los industriales.

Por otra parte, respecto a las operaciones de UAS de Clase B, la Resolución 04201 de 2018 dicta que: “Toda operación con UAS de Clase B deberá contar, para su ejecución, con la autorización de la DSNA según se describe en el capítulo 5 de este Apéndice” (Resolución 04201 de 2018).

Estas operaciones se encuentran sometidas a una serie de restricciones operativas, entre las que destacan las siguientes:

- El dron tiene que contar un MTOW de hasta 150 kg y no supere los 160 km/h de velocidad máxima.
- Siempre que sea posible, el operador debe mantener una línea de vista directa (VLOS) con el dron, dentro de un radio máximo de 750 metros.
- La aeronave no debe exceder una altura de 400 ft (123 metros) en tierra o agua.
- Se requiere un mínimo de visibilidad mínima de 5 km y una distancia de 500 ft (150 metros) de las nubes.

- La operación no está permitida a menos de 9 km de un aeropuerto o 3 km de un helipuerto sin una autorización anterior.
- Los vuelos no se permiten en áreas prohibidas, limitadas o peligrosas, a menos que sea autorizado explícitamente por la DSNA.
- Solo cada operador puede manejar un UAS a la vez, a excepción de operaciones de tipo enjambre autorizadas.
- Es ilegal el traslado de animales, sustancias peligrosas o explosivas, y el lanzamiento de objetos desde el dron en vuelo, a excepción de situaciones permitidas como actividades agrícolas. (Resolución 04201 de 2018)

Adicionalmente, la legislación establece limitaciones como no operar en lugares aledaños a infraestructura vital, bases militares, prisiones o cerca de jefes de estado; se prohíbe el funcionamiento de drones en áreas fronterizas internacionales o traspasarlas sin autorización.

Respecto a las condiciones de operación, la resolución establece que:

Antes de iniciar el vuelo, el operador deberá verificar el ambiente operacional, considerando riesgos hacia las personas y propiedades en la vecindad inmediata, tanto en superficie como en el aire, incluyendo las condiciones meteorológicas locales reinantes, clase de espacio aéreo, restricciones de vuelo en la zona, la ubicación de personas y propiedades y cualquier otro posible peligro en la superficie. (Resolución 04201 de 2018)

Por otro lado, se requiere que los operadores garanticen el funcionamiento adecuado de los sistemas de comunicación, energía y control, además de confirmar el cumplimiento de las limitaciones técnicas establecidas por el fabricante. Conjuntamente, se encuentra prohibido utilizar una UAS bajo la influencia de alcohol o sustancias que perjudiquen las habilidades del operador.

En respuesta a estas restricciones operativas, la legislación colombiana también impone requisitos formales y administrativos para el funcionamiento de UAS de Clase B, con la finalidad de reforzar la seguridad operacional y el monitoreo de las actividades ejecutadas. De acuerdo con lo establecido en el Apéndice 13 de la Parte 91 de los Reglamento Aeronáuticos de Colombia (RAC).

Cada operador de las UAS de Clase B requiere estar registrado en la base de datos oficial, suministrando datos personales o legales como su nombre, número de identificación, dirección de notificación, correo electrónico y números telefónicos de contacto (Resolución 04201 de 2018). Además, los operadores de UAS tienen la obligación de registrar cada uno de sus equipos, anexando documentos como la factura de compraventa, declaración técnica de la aeronave (estado de producción, modelo, número de serie, color, tipo de estructura, entre otros) y una imagen del número de serie junto con la fotografía de este (Resolución 04201 de 2018). Cualquier operador registrado debe poseer una acreditación de capacitación teórica y práctica otorgada por instituciones de instrucción autorizadas o universidades acreditadas, la cual debe estar adecuadamente registrada en la UAEAC (Resolución 04201 de 2018). Esta capacitación debe incluir campos como el derecho aéreo, meteorología, procedimientos operativos, comunicaciones aéreas, la administración de la seguridad operacional (SMS), navegación, y la intervención humana. En términos prácticos, el operador debe haber finalizado al menos diez horas de vuelo y diez horas de simulador, o su equivalente en tiempo real (Resolución 04201 de 2018).

La operación de UAS de Clase B requiere además, la necesidad de disponer de un Manual de Operaciones y Mantenimiento (M/OM) personal, el cual no necesita la aprobación previa de la autoridad, pero debe estar disponible para ser inspeccionado en cualquier instante

(Resolución 04201 de 2018). Igualmente, los explotadores deben efectuar un estudio de riesgos antes de empezar cada operación, realizar las inspecciones técnicas pertinentes y definir estrategias para evitar el agotamiento de los operadores, restringiendo su horario laboral a un máximo de diez horas de trabajo por cada veinticuatro horas de servicio (Resolución 04201 de 2018).

Es de importancia destacar que, conforme a la normativa, nunca se permitirá el funcionamiento de un UAS a menos de 100 metros de personas, propiedades o construcciones sin el permiso del propietario u ocupante de la propiedad (Aerocivil, 2018). Por otro lado, en caso de que la operación deba realizarse en espacio aéreo regulado, el operador debe llevar consigo un radio VHF portátil para mantener una comunicación constante con los servicios de tránsito aéreo (Resolución 04201 de 2018).

Igualmente, el operador es responsable de cualquier daño causado a terceros como resultado de las operaciones, y debe mantener vigentes las pólizas de seguros requeridas por la normativa aeronáutica vigente (Resolución 04201 de 2018). El operador debe asegurar la propiedad de los equipos, su adecuado mantenimiento, la inscripción de los operadores y la adquisición de las autorizaciones de vuelo necesarias (Resolución 04201 de 2018).

Respecto al permiso de vuelo, cualquier operación con UAS de Clase B o de Clase A bajo circunstancias especiales debe estar acompañada de una petición formal ante la Dirección de Servicios para Navegación Aérea (DSNA), enviada al correo electrónico oficial. Esta petición debe contener información como la identificación del dron, lugar y coordenadas de operación, altura, ruta prevista, duración de la operación, identificación de los operadores, y evidencia de que el UAS está en condiciones técnicas para ejecutar el trabajo (Resolución 04201 de 2018).

Por último, cabe destacar que cualquier vuelo en espacio aéreo controlado, limitado, prohibido o peligroso necesitará planeación previa con los servicios de tránsito aéreo o la autoridad aeronáutica pertinente (Resolución 04201 de 2018).

Por su relevancia la Resolución 04201 de 2018 se constituye como el principal marco normativo que reglamenta el uso de sistemas de aeronaves no tripuladas en Colombia, estableciendo los parámetros que deben cumplir los operadores designados y las compañías para su uso en actividades civiles e industriales.

## **2.2. Beneficios Tributarios Asociados a Tecnologías Limpias y Reducción en Emisiones de Gas Metano (CH<sub>4</sub>)**

Tras examinar la legislación que regula el uso de drones en Colombia en cuanto a seguridad aérea, protección de datos y regulación ambiental, es igualmente relevante analizar el marco normativo que dicta las ventajas fiscales y tributarias vinculadas a el uso de esta tecnología.

En este contexto, la Resolución No. 071 del 3 de diciembre de 1999 adopta el Reglamento Único de Transporte de Gas Natural (RUT) y define los parámetros de calidad que debe cumplir el gas natural en cuanto a potencia calorífica, contenido de azufre, existencia de inertes y límites de temperatura en la distribución. En su primer artículo, la resolución establece que: “El Reglamento Único de Transporte de Gas Natural - RUT -, contenido en el Anexo General de la presente resolución, el cual se aplicará a todos los agentes que utilicen el Sistema Nacional de Transporte de Gas Natural” (Resolución 071 de 1999). A continuación, se resume las características de calidad del gas natural establecidas en dicha resolución:

**Tabla 1***Especificaciones de calidad del gas natural*

Especificaciones	Sistema internacional	Sistema inglés
Máximo poder calorífico bruto (GHV) <sup>a</sup>	42.8 MJ/m <sup>3</sup>	1.150 BTU/ft <sup>3</sup>
Mínimo poder calorífico bruto (GHV) <sup>a</sup>	35.4 MJ/ m <sup>3</sup>	950 BTU/ft <sup>3</sup>
Contenido de líquido <sup>b</sup>	Libre de líquidos	Libre de líquidos
Contenido total de H <sub>2</sub> S máximo	6 mg/ m <sup>3</sup>	0.25 grano/100PCS
Contenido total de azufre máximo	23 mg/ m <sup>3</sup>	1.0 grano/100PCS
Contenido CO <sub>2</sub> , máximo en % volumen	2%	2%
Contenido de N <sub>2</sub> , máximo en % volumen	3	3
Contenido de inertes máximo en % volumen <sup>c</sup>	5%	5%
Contenido de oxígeno máximo en % volumen	0.1%	0.1%
Contenido de agua máximo	97 mg/ m <sup>3</sup>	6.0 Lb/MPCS
Temperatura de entrega máximo	49 °C	120 °F
Temperatura de entrega mínimo	4.5 °C	40 °F
Contenido máximo de polvos y material en suspensión <sup>d</sup>	1.6 mg/ m <sup>3</sup>	0.7 grano/100 pc

*Nota.* Reproducido de Comisión de Regulación de Energía y Gas, *Resolución 071 de 1999*,

(1999). <sup>a</sup> Todos los datos referidos a metro o pie cúbicos de gas se referencian a Condiciones

Estándar. <sup>b</sup> El Gas Natural deberá entregarse con una calidad tal que no forme líquido, a las

condiciones críticas de operación del Sistema de Transporte. [...]. <sup>c</sup> Se considera como contenido

de inertes la suma de los contenidos de CO<sub>2</sub>, nitrógeno y oxígeno. <sup>d</sup> El máximo tamaño de las partículas debe ser 15 micrones.

Al establecerse los estándares mínimos de calidad que debe cumplir el gas natural dentro del sistema de transporte nacional, aseguran que la operación y supervisión del sistema se

realicen bajo condiciones que antepongan la eficiencia, la seguridad y la sostenibilidad ambiental.

Ahora bien, junto con la regulación técnica del sector, el gobierno colombiano ha elaborado un conjunto de normativas orientadas a incentivar fiscal y tributariamente el uso de tecnologías limpias en el sector energético, incluyendo las vinculadas a la administración eficaz de la energía y la disminución de emisiones. Entre ellas la Ley 2099 de 2021 “Por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones” (Ley 2099 de 2021).

En el Artículo 2, se modifica el artículo 1° de la Ley 1715 de 2014, definiendo como meta el fomento de las fuentes no convencionales de energía (FNCE), con el propósito de promover el desarrollo económico sostenible, disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero y potenciar la seguridad energética (Ley 2099 de 2021).

Por otro lado, el Artículo 8 establece incentivos para la producción de energía eléctrica a partir de FNCE y la administración eficiente de energía, otorgando a los contribuyentes que declaren impuestos deducir hasta el 50 % de la inversión realizada, en un periodo de hasta 15 años, estando condicionados a la valoración y certificación del proyecto realizado por la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) (Ley 2099 de 2021).

El Artículo 9 decreta que el impuesto sobre las ventas (IVA) no se aplica en la compra de bienes y servicios, ya sean nacionales o importados, destinados a proyectos energéticos sostenibles, siempre que estén incluidos dentro del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales (PROURE) (Ley 2099 de 2021).

De igual manera, Artículo 10 concede un incentivo arancelario que exonera de la obligación de pagar derechos de importación a las nuevas inversiones en proyectos de FNCE y medidas de eficiencia energética, cuando estos no pueden ser reemplazados por la industria nacional (Ley 2099 de 2021).

En última instancia, el Artículo 11 autoriza el uso de la depreciación acelerada de activos para maquinaria, equipos y obras civiles requeridas en estas iniciativas, otorgando una tasa mundial anual del 33.33 %. Al igual que en escenarios anteriores, la validación de los proyectos debe llevarse a cabo ante la UPME dentro del marco del programa PROURE (Ley 2099 de 2021).

Estas condiciones dejan ver una intención normativa por parte de el congreso de fomentar la transformación tecnológica del sector energético colombiano. Desde este punto de vista, la integración de drones en operaciones como la detección de fugas de gas metano se proyecta como una medida alineada con los objetivos de eficiencia energética, facilitando el acceso potencial a los incentivos específicos de la Ley 2099 del 2021.

Dentro de este marco legal y normativo se ha implementado el Plan de Acción Indicativo 2022 – 2030 para el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PAI-PROURE), estableciendo mediante la Resolución No. 40156 del 29 de abril de 2022 emitida por el Ministerio de Minas y Energía, esta representa una guía para disminuir el consumo energético y de emisiones contaminantes, de acuerdo con los compromisos climáticos internacionales adquiridos y la transformación del sistema de producción nacional (Resolución 40156 de 2022).

La Resolución No. 40156 del 29 de abril de 2022: Por la cual se adopta el Plan de Acción Indicativo 2022 – 2030 para el desarrollo del Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía, PROURE, que define objetivos y metas indicativas de eficiencia energética,

acciones y medidas sectoriales y estrategias base para el cumplimiento de metas y se adoptan otras disposiciones [...]

Artículo 3. Potenciales de reducción del consumo de energía y emisiones por sectores. Adoptar por sector, como indicativos, los siguientes potenciales de reducción del consumo de energía y emisiones evitadas de Gases de Efecto Invernadero – GEI, del PAI-PROURE 2022-2030:

**Tabla 2**

*Potenciales de reducción del consumo de energía y emisiones por sectores*

Sector	Ahorro potencial (PJ)	Meta de ahorro (%)	Emisiones evitadas (MTonCO <sub>2</sub> )
Residencial	523.07	3.11%	8.23
Transporte	673.33	4.00%	50.33
Terciario	131.71	0.78%	6.25
Industrial	256.36	1.52%	14.12
Termoeléctrico	25.46	0.15%	1.89
<b>Hidrocarburos</b>	<b>27.67</b>	<b>0.16%</b>	<b>1.66</b>
Minería	11.46	0.07%	0.77
Edificaciones	38.08	0.23%	1.75
Almacenamiento	1.05	0.01%	0.003
Distritos térmicos	0.35	0.002%	0.008
Totales	1688	10%	85.02

*Nota.* Reproducido de Resolución 40156 de 2022, por el Ministerio de Minas y Energía, 2022.

La tabla 2 muestra el potencial de reducción del consumo de energía equivalente a 1.688 PJ acumulados en el periodo 2022 – 2030, y que corresponden a una reducción del 10% frente al escenario tendencial. A su vez, el ahorro energético del 10% se distribuyen en los sectores analizados en el PAI-PROURE 2022 – 2030. (Resolución 40156 de 2022)

En este escenario estratégico, la industria de los hidrocarburos tiene un rol significativo, la solución incluye determinadas medidas orientadas a optimizar su rendimiento energético y ambiental, entre las que sobresalen las vinculadas a la identificación y gestión de emisiones por fugas de gas.

Artículo 5. Medidas y acciones sectoriales. Señalar las medidas y acciones sectoriales para el cumplimiento de las metas establecidas en el PAI-PROURE 2022 – 2030:

[...] F. En el sector hidrocarburos:

- Mejores prácticas en la producción
- Implementar programas de detección y reparación de fugas.
- Actualización de procesos en la producción
- Adquisición de equipos para la reducción de fugas o la recuperación de vapor.

(Resolución 40156 de 2022)

La Resolución No. 40156 de 2022 no solo hace oficial la adopción del Plan de Acción Indicativo para el desarrollo del PROURE, sino que también define las directrices estratégicas y objetivos sectoriales para disminuir el consumo de energía y las emisiones de gases de efecto invernadero en el país. Esta resolución constituye un punto de partida importante en la elaboración de políticas públicas de eficiencia energética, añadiendo acciones concretas para cada sector económico, incluido el de hidrocarburos.

Con el fin de promover la eficiencia energética en distintos sectores de producción, el Plan de Acción Indicativo - PROURE define metas concretas y medidas de prioridad para el sector de hidrocarburos. Dentro de estos objetivos figuran:

Promover la adopción, seguimiento y control de buenas prácticas en la operación y mantenimiento de las operadoras en línea con la norma ISO 50001.

Proponer por la optimización de procesos en el upstream y midstream del sector. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2022)

Para lograr estos objetivos, se analizaron diversas medidas de eficiencia energética diseñadas específicamente a las unidades de operación del sector. Estas medidas se caracterizaron de acuerdo con su naturaleza y se resumen en la siguiente tabla:

**Tabla 3**

*Medidas de eficiencia energética analizadas para el sector hidrocarburos*

Tipo de medida	Medidas	Acciones
Buenas prácticas	1. Mejores prácticas en la producción	1.4. Implementar programas de detección y reparación de fugas.
	3. Sistemas de Gestión de la Energía	3.3. Adquisición de medidores para la sub-medición en los equipos de uso final.
Aprovechamiento de energía	4. Actualización de procesos en la producción	4.2. Adquisición de equipos para la reducción de fugas o la recuperación de vapor.
	7. Recuperación de gas	7.2. Adquisición de equipos de sustitución del control de vapor.

*Nota.* Adaptado de *Plan de Acción Indicativo – PROURE 2022-2030*, por el Ministerio de Minas y Energía, 2022.

En cuanto a los resultados proyectados de estas medidas, el documento aclara que:

A diferencia de los demás sectores, aquí no se utiliza un escenario tendencial. [...] El ejercicio de simulación de eficiencia energética para el sector de hidrocarburos resultó en un potencial ahorro de 27.68 PJ en el periodo 2022–2030, lo que comparado con el escenario de producción resulta en una reducción del 3.71%. (Unidad de Planeación Minero Energética, 2022)

La siguiente tabla expone los resultados específicos de cada grupo de medidas en términos de energía ahorrada como de reducción de emisiones; el aporte global porcentual representa el peso relativo de cada medida sobre la meta sectorial de hidrocarburos:

**Tabla 4**

*Resumen de resultados de las medidas de eficiencia energética propuestas para el sector hidrocarburos*

Medida	Reducción de demanda (2022-2030) PJ	%	Emisiones evitadas acumuladas (2022-2030) Ton CO <sub>2</sub>	%	Aporte global %
Buenas prácticas	9.90	35.77%	593.703	35.65%	35.71%
Cambio tecnológico	4.44	16.06%	266.318	15.99%	16.02%
Generación de energía	3.12	11.28%	187.248	11.24%	11.26%
Recuperación de gas	10.21	36.91%	617.958	37.11%	37.01%
Total	27.68		1.665.227		

*Nota.* Reproducido de *Plan de Acción Indicativo – PROURE 2022-2030*, por el MME, 2022.

Según los objetivos sectoriales fijados en el PAI-PROURE 2022-2030, se han establecido medidas adicionales que permiten un uso efectivo, especialmente mediante instrumentos de incentivo económico. En este aspecto la UPME emitió la Resolución No. 000504 de 2023, la cual renueva y expande la lista de bienes y servicios relacionados con medidas de Gestión Eficiente de Energía (GEE). Esta resolución especifica los equipos y tecnologías que pueden obtener los beneficios tributarios de acuerdo con la Ley 1715 de 2014.

La Resolución No 000504 de 2023 de la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME establece: “Por la cual se modifica el Anexo 2 de la Resolución UPME No. 000319 de 2022 – Lista de bienes y servicios GEE para acciones o medidas de gestión eficiente de energía-

GEE actualizada con ocasión a la adopción del PAI-PROURE 2022-2030” (Resolución 000504 de 2023).

En su articulado se dispone:

Artículo 1. Modificar el Anexo 2 de la Resolución UPME No. 000319 de 2022 Lista de bienes y servicios GEE para acciones o medidas de gestión eficiente de energía- GEE actualizada con ocasión a la adopción del PAI-PROURE 2022-2030, en el sentido de incluir algunos elementos, equipos, maquinaria, o servicios a la lista de bienes y servicios susceptibles de acceder a los incentivos tributarios establecidos en los artículos 11, 12, 13 y 14 de la Ley 1715 de 2014, de conformidad con la parte considerativa de este acto administrativo. (Resolución 000504 de 2023)

En el nuevo Anexo 2 se detalla la lista de bienes y servicios GEE para acciones o medidas de gestión eficiente de energía, que pueden aplicarse de manera transversal o por sector, con el siguiente detalle:

Medida: Medición o submedición inteligente

Acción:

Adquisición de equipos de subdivisión para equipos de uso final en cualquier sector:

Sensores para medir variables de proceso: temperatura, calor, presión, humedad, flujo volumétrico y flujo másico.

Con conectividad por corriente, voltaje, protocolos de comunicación industrial y protocolos de IoT.

Se deberá especificar: Marca y modelo/referencia de los equipos.

Asimismo, se mencionan:

Concentradores de información: Dispositivos de cómputo de placa reducida basados en arquitectura ARM con conectividad alámbrica e inalámbrica disponible para protocolos de comunicación industrial y comunicación IoT.

Se deberán especificar: Marca y modelo/referencia de los equipos. [...]

Para el sector hidrocarburos, la medida prioritaria identificada es la recuperación de gas, con la siguiente acción específica:

Adquisición de equipos para recuperación de gas de tea y de hidrocarburos condensables.

Además, se incluyen:

Equipos de control automático para el sistema de recuperación de gas.

Se deberá especificar: Marca y modelo / referencia. (Resolución 000504 de 2023)

Con el objetivo de fortalecer la gestión eficiente de la energía y la regulación de emisiones en el sector hidrocarburos, el marco normativo colombiano ha venido incorporando medidas cada vez más precisas. Una de estas La Resolución No. 40317 de 10 de abril de 2023: “Por la cual se modifica la Resolución 40066 de 11 de febrero de 2022, mediante la cual se establecen requerimientos técnicos para la detección de fugas, el aprovechamiento, quema y venteo de gas natural durante las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos” (Resolución 40317 de 2023).

Esta resolución incorpora modificaciones en las definiciones clave y disposiciones técnicas para robustecer la gestión ambiental y operacional en el sector hidrocarburos.

Al respecto, se establece que las Buenas Prácticas de la Industria del Petróleo abarcan técnicas y procedimientos seguros y eficientes, orientados a optimizar la extracción de hidrocarburos y asegurar la seguridad de la operación. El concepto de Equipos como aquellos componentes, incluidos líneas de flujo u otros dispositivos, que puedan llegar a tener una fuga de

gas natural. Además, se presenta el término de Estudio Técnico–Económico, el cual se define como el estudio de todas las opciones posibles para el aprovechamiento del gas, incluyendo tecnologías emergentes y posibilidades de uso.

Se definen conceptos operativos como Eventos No Planeados, que se definen como fallas imprevistas en instalaciones o equipos que necesitan mantenimiento correctivo, e Imprevistos, entendidos como distintos eventos por causas operativas que pueden provocar daños reales o potenciales. Una de las definiciones más destacadas es la de Fugas de Gas Natural, vista como “la liberación no intencional de gas natural a la atmósfera en una facilidad de exploración y explotación, como resultado de la operación de componentes gastados, descompuestos, sueltos y equipos que se encuentren emitiendo en exceso de su desempeño normal” (Resolución 40317 de 2023). Se indica que se califica como fuga cuando la concentración registrada es igual o mayor a 500 ppm.

También se incorporan definiciones ambientales como la de Gas Natural, caracterizada como una combinación de gases con mayor predominancia de gas metano, y Gases de Efecto Invernadero (GEI), “componentes gaseosos de la atmósfera [...] que absorben y emiten la energía solar, siendo el metano (CH<sub>4</sub>) uno de los principales” (Resolución 40317 de 2023). En última instancia, el concepto Potencial de Emisión hace referencia al volumen estándar anual de gas natural que podría ser liberado totalmente a la atmósfera, expresado en metros cúbicos anuales.

Con relación a la identificación y monitoreo de emisiones de gas natural la Resolución No. 40317 de 2023 indica cambios importantes al artículo 43 de la Resolución 40066 de 2022, tales como, la necesidad de utilizar instrumentos como detectores láser o electrónicos, siempre que obtengan la aprobación de la entidad de control correspondiente.

Adicionalmente, se prevé que: "El uso de los instrumentos se complementará con la inspección técnica, visual y en algunos casos, de ser posible, con el uso de aeronaves, satélites, drones, robots, vehículos, escaneos de área, cámaras infrarrojas estacionarias, entre otros." (Resolución 40317 de 2023).

La resolución también requiere que los instrumentos sean capaces de detectar concentraciones de gas natural iguales o superiores a 500 ppm, expresando los resultados en gramos, kilogramos o toneladas métricas, y que posean con acreditación del fabricante respecto a su precisión y correcto mantenimiento. Los instrumentos que necesiten calibración deben ser comprobados por laboratorios acreditados bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025 o entidades reconocidas por ILAC.

En la modificación del artículo 51, se impone la responsabilidad para los operadores de proporcionar, en un periodo máximo de 60 días desde la entrega de la línea base, un plan específico para la identificación y atención de fugas, que deberá tener todos los equipos y elementos de cada instalación. "El programa considerará al menos una inspección semestral a las facilidades y, en caso de detectar fugas, se deberán implementar las acciones correctivas correspondientes." (Resolución 40317 de 2023).

El estudio de la normativa actual ha facilitado identificar las regulaciones que rigen el uso de drones especializados para operaciones industriales. Además de tratar las normativas legales referentes a las operaciones, seguridad y protección de datos, se han identificado incentivos tributarios y beneficios fiscales que promueven la adopción de esta tecnología.

Esta reglamentación no solo instruye en el cumplimiento de las normativas aplicables, sino que también constituye un escenario para que las compañías del sector potencien sus estrategias operativas. El uso de drones, además de pronosticar mejorar la eficiencia y protección

en la detección de fugas de gas metano, favorece el cumplimiento de los compromisos nacionales adquiridos en cuanto a sostenibilidad y disminución de emisiones, en concordancia con los objetivos ambientales y energéticos del país.

### **3. Eficiencia e Impacto Ambiental de los Drones en la Detección de Fugas de Gas Metano (CH<sub>4</sub>)**

El propósito de este capítulo es evaluar el impacto ambiental y operativo del uso de UAS equipadas con sensores especializados para la detección de fugas de gas metano (CH<sub>4</sub>), en contraste con los métodos tradicionales utilizados en la industria de hidrocarburos.

Para este análisis se empleó un diseño de investigación descriptivo basado en la validación de literatura técnica, reportes de sostenibilidad de operadoras en Colombia (Ecopetrol y Gran Tierra Energy) y especificaciones de fabricantes. Los criterios de evaluación se definieron mediante la capacidad técnica (sensibilidad y precisión), eficiencia operativa (cobertura temporal y espacial) y seguridad industrial (reducción de exposición al riesgo).

#### **3.1. Métodos Tradicionales de Detección de Fugas**

Previo al uso de tecnología como los drones, la industria de hidrocarburos se ha apoyado en métodos tradicionales para identificar fugas de gas. Aunque estos métodos han sido importantes para la seguridad operativa, presentan restricciones en cuanto a cobertura, exactitud y tiempo de reacción.

A continuación, se detallan los principales métodos tradicionales empleados en la industria colombiana, destacando sus beneficios, inconvenientes y su utilidad en diversos entornos de operación.

##### ***3.1.1. Inspección con Cámaras FLIR Manuales***

Las cámaras infrarrojas FLIR (Forward Looking Infrared) son herramientas portátiles que permiten la visualización de gases invisibles al ojo humano como lo es el gas metano (CH<sub>4</sub>), mediante tecnología de imagen óptica de gases (OGI, por sus siglas en inglés). Estas cámaras son utilizadas en la industria del petróleo y gas para la detección de fugas de gas en tiempo real, sin necesidad de contacto directo con las fuentes de emisión.

### Tabla 5

#### *Ventajas y desventajas de la inspección con cámaras FLIR OGI manuales*

Ventajas	Desventajas
Facilitan una identificación visual no intrusiva.	Necesita manejo manual y personal calificado.
Detección rápida de fugas evidentes en la imagen térmica.	Tienen una cobertura restringida por cada sesión de revisión.
Se puede instalar en lugares abiertos, pero con instalaciones de fácil acceso.	Su desempeño se ve influenciado por las condiciones meteorológicas (viento, lluvia o temperatura de su entorno).

*Nota.* Elaboración propia a partir de Center for Human Rights and Environment (2019), Ecopetrol S.A. (2022), FLIR Systems (s. f. c), FLIR Systems (2021), Kebir et al. (2024) y Ravikumar et al. (2019).

En Colombia, empresas del sector han incorporado el uso de cámaras OGI para mejorar la detección de emisiones de metano. Ecopetrol ha implementado tecnologías de vanguardia, incluyendo cámaras infrarrojas, para la detección y cuantificación de emisiones de metano en sus operaciones en 2021. Esta tecnología permitió evaluar aproximadamente el 95% de los activos operados por la empresa, cubriendo áreas como estaciones de compresión y plantas de procesamiento (Ecopetrol S.A., 2022).

Por otro lado, entidades como el Centro de Derechos Humanos y Ambiente (CHRE, por sus siglas en inglés) han empleado cámaras FLIR para registrar emisiones de gases en lugares de extracción y producción petrolera ubicados en Colombia.

### 3.1.2. Sensores Portátiles de Gas

Tradicionalmente, los sensores portátiles de gas como catalíticos y electroquímicos se han usado para el monitoreo en áreas rurales o de acceso complejo, donde resulta posible el uso de sensores fijos o cámaras de posición fija.

**Tabla 6**

*Ventajas y desventajas de los sensores portátiles de gas*

Ventajas	Desventajas
Alta sensibilidad para la identificación inmediata.	Inspección dependiente del operador.
Adaptables y pueden ser reutilizados.	Necesita acceso físico al lugar de la posible fuga.
Costo reducido de compra y funcionamiento.	Incremento en la exposición del personal al peligro.

*Nota.* Elaboración propia a partir de CO<sub>2</sub>Meter (2026), International Gas Detectors (2023) y Luecke (2016).

Empresas de la industria de los hidrocarburos colombiana han usado sensores portátiles para la detección de fugas de gas en sus operaciones. En 2021, Ecopetrol hizo uso de sensores portátiles en algunas de sus actividades para hacer chequeos rápidos en lugares concretos como los pozos donde se extrae petróleo o las estaciones de compresión de gas, con el objetivo de localizar y medir fugas de gas en secciones específicas (Ecopetrol S.A., 2022).

De igual forma, compañías como Gran Tierra Energy han empleado sensores portátiles para identificar emisiones de gases en las zonas remotas de la región del Putumayo, donde el acceso es reducido y los sensores fijos no son efectivos (Gran Tierra Energy, 2021).

### ***3.1.3. Sensores Fijos Instalados en Infraestructura***

Los sensores de detección de gases fijos se ubican de manera permanente en lugares críticos dentro de la infraestructura industrial, comúnmente estaciones de compresión, válvulas, plantas de procesamiento o centros de distribución, complementándolos con sistemas de SCADA. Estos equipos brindan un seguimiento continuo de los niveles de gases en lugares estratégicos, lo que favorece la activación de alertas tempranas frente a la presencia inusual de sustancias como el CH<sub>4</sub>. Su vinculación con sistemas de control y supervisión industrial (SCADA) brinda una respuesta casi instantánea al enfrentar situaciones de posibles fugas (Morsi & Mostafa, 2012).

**Tabla 7**

*Ventajas y desventajas de sensores fijos instalados en infraestructura*

Ventajas	Desventajas
Control en tiempo real y de manera automática.	Cobertura restringida únicamente al área cercana donde se establecen.
Capacidad para integrarse con sistemas de control centralizados (SCADA).	Elevados gastos de instalación y mantenimiento, particularmente en áreas remotas.
Activación de alertas que facilitan una respuesta rápida.	Dificultades para identificar fugas en segmentos extensos o de difícil acceso.

*Nota.* Elaboración propia a partir de Gewee (s.f.), Interscan (s.f.), Morsi y Mostafa (2012), OBW Technologies (2023) y TG Technical Services (s.f.).

Por otra parte, el uso de sensores fijos ha evidenciado ser un recurso efectivo no solo para la identificación rápida de fugas, sino también para mejorar el seguimiento de eventos y reforzar los procedimientos de mantenimiento preventivo (Ecopetrol S.A., 2022).

### ***3.1.4. Inspección Visual***

La inspección visual como método de inspección de fugas de gas se basa en la verificación directa de equipos, tuberías y otros elementos para detectar señales de fugas, tales como manchas, corrosión, daños o acumulación de gas.

En Colombia, la Resolución 40066 del Ministerio de Minas y Energía, expedida el 11 de febrero del año 2022 dicta directrices y requisitos técnicos para la identificación y atención de fugas de gas natural en el proceso de exploración y extracción de hidrocarburos. Esta destaca la importancia de llevar a cabo inspecciones visuales regulares en equipos fundamentales, tales como juntas bridadas, roscas de válvulas y juntas de dilatación, con el fin de asegurar la seguridad y eficacia de las operaciones (Resolución 40066 de 2022).

La inspección visual potenciada con tecnologías innovadoras, como drones habilitados con cámaras infrarrojas y térmicas, facilitando la inspección de zonas de difícil acceso sin interferir con las operaciones (Kon, 2024). Estos drones contribuyen a disminuir el tiempo de parada y resguardan al personal al prevenir exposiciones a situaciones de riesgo.

**Tabla 8**

*Ventajas y desventajas de la inspección visual*

Ventajas	Desventajas
Implementación sencilla y económica.	Se basa en la destreza del inspector y la visibilidad del daño o fuga.
Identificación de fugas evidentes o daños perceptibles en los equipos.	No resulta eficaz para el seguimiento constante en grandes zonas.

Ventajas	Desventajas
Ideal para zonas de difícil acceso donde otros procedimientos no pueden emplearse.	Esta técnica se ve restringida en situaciones de escasa visibilidad o en ambientes con gran concentración de gas o humo.

*Nota.* Elaboración propia a partir de Kizeo (2023), Smith y Adendorff (2012) y Kon (2024).

Para Simplificar la comparación entre los diferentes métodos estudiados, a continuación, se muestra en la Tabla 9 un resumen de sus principales ventajas y desventajas:

**Tabla 9**

*Comparación de métodos tradicionales para la detección de fugas de gas metano (CH<sub>4</sub>)*

Método	Ventajas	Desventajas
Inspección con cámaras FLIR manuales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Visualización no intrusiva en tiempo real</li> <li>• Identificación rápida de fugas</li> <li>• Útiles en espacios abiertos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Requiere personal capacitado</li> <li>• Cobertura limitada por sesión</li> <li>• Afectadas por condiciones meteorológicas</li> </ul>
Sensores portátiles de gas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Lectura directa de concentraciones</li> <li>• Fáciles de transportar</li> <li>• Costos moderados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Necesidad de proximidad a la fuente</li> <li>• Menor eficacia en espacios grandes</li> <li>• Poca capacidad de registro continuo</li> </ul>
Sensores fijos instalados en infraestructura	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Monitoreo continuo</li> <li>• Detección automática y en tiempo real</li> <li>• Ideal para instalaciones críticas</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto costo de instalación y mantenimiento</li> <li>• Cobertura limitada al punto fijo donde están ubicados</li> </ul>
Inspección visual	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo</li> <li>• Fácil de implementar</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alta subjetividad</li> <li>• Ineficaz ante fugas no visibles</li> </ul>

Método	Ventajas	Desventajas
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No requiere equipos sofisticados</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No permite cuantificación</li> </ul>

*Nota.* Elaboración propia a partir de Energy Agency (2021), Kraidi et al. (2024), Ravikumar et al. (2017), U.S. Environmental Protection Agency (2007) y U.S. Environmental Protection Agency (2022).

Como se puede apreciar en la Tabla 9, a pesar de que los métodos tradicionales han sido usados frecuentemente en el sector para la identificación de fugas de gas, estos aun poseen ciertas restricciones significativas en cuanto a cobertura de áreas extensas o de difícil acceso, requieren intervención de los operadores y habilidad de los mismos para reaccionar ante circunstancias críticas.

En este sentido, los drones con sensores especializados en detectar gas metano emergieron como una opción con gran potencial al hacer posible inspecciones en zonas remotas, además de monitoreos más rápidos y seguros. A continuación, se ofrece una descripción del uso de drones para detectar emisiones de gas metano, sus componentes clave y beneficios.

### **3.2. Uso de Drones en la Detección de Fugas de Gas**

El uso de Sistemas Aéreos No Tripulados (UAS, por sus siglas en inglés) ha transformado los métodos de inspección en el sector de hidrocarburos, al permitir la supervisión de extensas áreas en un periodo de tiempo reducido. Estos drones equipados con sensores específicos tienen la capacidad de detectar, documentar y georreferenciar emisiones de CH<sub>4</sub> por fugas desde el aire, lo que permite su seguimiento en tiempo real y mejora la capacidad de reacción frente a eventos no previstos, recolectando información que posteriormente se procesa para su análisis y toma de decisiones.

En el contexto colombiano, empresas como Ecopetrol han empezado a incorporar tecnología UAS en sus estrategias para la identificación y gestión de emisiones de gases provocadas por fugas. Según informes de sostenibilidad y divulgaciones institucionales, la compañía ha realizado inspecciones aéreas con sensores de gas metano complementando los métodos de monitoreo como la espectroscopia satelital y el uso de cámaras infrarrojas en tierra (Ecopetrol S.A., 2023a).

En cuanto a los UAS comúnmente usados en la industria, destacan los sistemas multirrotor (DJI Matrice 300 RTK) debido a su capacidad de vuelo estacionario, precisión y maniobrabilidad en zonas de infraestructura densa (Hinas et al., 2017). Para coberturas más amplias y lineales, como ductos o corredores remotos, se han usado drones de ala fija como el SenseFly eBee, reconocido por su autonomía extendida y eficiencia operativa (EagleNXT, s. f.).

La capacidad de identificar fugas de gas metano de forma temprana a través de UAS depende en su mayoría del tipo de sensor que se incorpore al sistema. Entre las tecnologías usadas con mayor frecuencia están la espectroscopía de absorción láser de diodo sintonizables (TDLAS, por sus siglas en inglés), la imagen óptica de gases (OGI, por sus siglas en inglés) y los sensores ultrasónicos. Cada uno de estos sensores tiene beneficios específicos en términos de sensibilidad, exactitud, condiciones de funcionamiento y operatividad en el terreno.

### ***3.2.1. Espectroscopía de Absorción Láser de Diodo Sintonizable (TDLAS)***

La tecnología TDLAS (Figura 1), se destaca como uno de los sensores más avanzadas tecnológicamente y confiables para la identificación de gases como el metano (CH<sub>4</sub>). Se basa en la absorción selectiva de un diodo laser sintonizado a la frecuencia con la que el CH<sub>4</sub> absorbe la luz. Al analizar la cantidad de luz absorbida, se puede calcular la concentración de metano presente en el área.

**Figura 1**

*Sensor Laser Methane mini - TDLAS*



*Nota.* Adaptado de *Laser Methane compact and portable methane gas detector*, por Pergam-Suisse AG (s. f.).

Este sensor brinda una alta sensibilidad y precisión, incluso resulta altamente eficaz en entornos abiertos donde otros métodos pueden perder efectividad por el viento u otros elementos del entorno y meteorológicos. Corbett y Smith (2022) demostraron que los sensores TDLAS en sistemas multirrotores y a la fija pueden cuantificar emisiones de metano de activos producción de hidrocarburos eficientemente.

En términos operativos, el sensor Pergam Laser Methane mini (Lmm) es uno de los sensores más utilizados, usualmente utilizado en drones multirrotores para la identificación aérea de gas metano. Este sensor permite la detección de emisiones a distancias de hasta 30 metros desde el origen (Pergam-Suisse AG, s. f.).

En Colombia, según su reporte de sostenibilidad Ecopetrol ha llevado a cabo pruebas piloto y monitoreos en campo para identificar fugas, incorporados como parte de su estrategia de reducción de emisiones (Ecopetrol S.A., 2023a).

**Tabla 10***Ventajas y desventajas de la espectroscopía de absorción láser de diodo sintonizable (TDLAS)*

Ventajas	Desventajas
Alta sensibilidad y específicamente para gas metano.	Rango de detección efectivo restringido en circunstancias de viento intenso o con obstáculos visuales.
Interferencia ambiental y meteorológica reducida (resistente a cambios de temperatura o humedad).	Disminución en la capacidad de determinar la forma de dispersión de la pluma sin sistemas complementarios.
Capacidad para llevar a cabo mediciones sin tener contacto directo con los gases o la fuente de emisión.	-

*Nota.* Elaboración propia a partir de Endress+Hauser (2025), Kwaśny y Bombalska (2023), Liu et al. (2020) y Wang et al. (2019).

### 3.2.2. Imagen Óptica de Gases (OGI)

A diferencia de los métodos manuales, las cámaras OGI instaladas en sistemas UAS por medio de un gimbal estabilizado, permiten el escaneo de facilidades y zonas extensas en un solo vuelo, identificando nubes de gas mediante emisiones térmicas.

Durante las operaciones, dispositivos como la cámara FLIR GF (ver Figura 2) se han establecido como líderes en el sector debido a su capacidad para detectar compuestos orgánicos volátiles (COVs) y metano con alta precisión. Las versiones diseñadas específicamente para plataformas aéreas proporcionan imágenes térmicas de alta resolución mejorando así la eficiencia de la detección remota.

**Figura 2***Cámara FLIR GF320 - OGI*

*Nota.* Adaptado de *GF320 infrared camera for methane and VOC detection*, por FLIR Systems (s. f. b).

Estas cámaras no determinan la concentración exacta del gas, sin embargo, permiten localizar visualmente la fuente de la fuga, lo cual es de utilidad para respuestas operativas rápidas (Teledyne FLIR LLC, s. f.).

**Tabla 11***Ventajas y desventajas de Imagen Óptica de Gases (OGI)*

Ventajas	Desventajas
Monitoreo en tiempo real de fugas de gas.	No es posible medir la concentración del gas sin sistemas complementarios.
No necesita contacto directo con el gas ni realizar paradas en la operación.	La sensibilidad depende de las condiciones ambientales y meteorológicas (temperatura, viento).
Útil en inspecciones aéreas sistemáticas a través de UAS.	Podría necesitar de personal capacitado para interpretar correctamente las imágenes térmicas.

Ventajas	Desventajas
Identifica múltiples tipos de COVs además del gas metano.	-

*Nota.* Elaboración propia a partir de FLIR Systems (s. f. c), Kang et al. (2022), Liu et al. (2020) y Ravikumar et al. (2017).

### 3.2.3. *Sensores de Ultrasonido*

Los sensores de ultrasonido utilizados como complemento detectan el ruido acústico de alta frecuencia (>20 kHz) generado por escapes de gas presurizado a través de fisuras o uniones defectuosas (Rodríguez & Torres, 2025). Este principio ha sido usado en sistemas fijos de detección de fugas y su valor radica en su operatividad en condiciones en donde hay poca o nula visibilidad. En contraste con tecnologías como TDLAS u OGI, no necesitan una línea de visión directa ni condiciones ideales de luz o temperatura para operar.

En cuanto a los sistemas UAS, la integración de sensores de ultrasonido es relativamente sencilla debido a su peso liviano y bajo consumo de energía. No obstante, debido a su carácter cualitativo, se sugiere emplearse como un complemento adicional de sensores ópticos o láser. Esto permite identificar potenciales áreas de fuga mediante ultrasonido, y posteriormente llevar a cabo una inspección cuantitativa con sensores TDLAS o cámaras OGI.

Un caso documentado es el uso del sensor ultrasónico FT742-SM (Ver Figura 3), originalmente diseñado como anemómetro de precisión, que ha sido modificado para medir el flujo de gas en vertederos a través de drones multirrotor (como el DJI M600) en Reino Unido, mostrando resultados favorables en términos de cobertura y detección rápida de fugas de gas (FT Technologies, s. f.a).

**Figura 3***Sensor ultrasónico FT742-SM*

*Nota.* Adaptado de *FT742-SM wind sensor*, por Unmanned Systems Source, (s. f.).

**Tabla 12***Ventajas y desventajas de sensores de ultrasonido*

Ventajas	Desventajas
No tiene restricciones meteorológicas o de entorno como iluminación específica ni visibilidad.	Solo detectan el sonido del escape de gas, no cuantifica o registra la cantidad de gas metano.
Útil en redes de gas presurizado, debido a la rapidez en detección de fugas activas.	Disminuye su eficiencia si se encuentra a distancias extensas de la fuga (sonido emitido de esta).
Complemento perfecto de sistemas ópticos y espectroscópicos.	Necesita filtros digitales y algoritmos avanzados para prevenir detecciones falsas ante ruidos mecánicos o industriales.

*Nota.* Elaboración propia a partir de partir de MSA Safety (2016), Mu *et al.* (2024), Rodríguez y Torres (2025) y Singh *et al.* (2023).

Mediante el estudio individual de los sensores más usados en UAS para la identificación de fugas de CH<sub>4</sub>, es posible realizar una comparación entre ellos. Esta recolección de datos

facilita establecer sus características distintivas entre ellos, ventajas técnicas y restricciones prácticas. A continuación, la tabla 13 sintetiza los aspectos más sobresalientes:

**Tabla 13**

*Comparación técnica de sensores usados en drones para detección de metano*

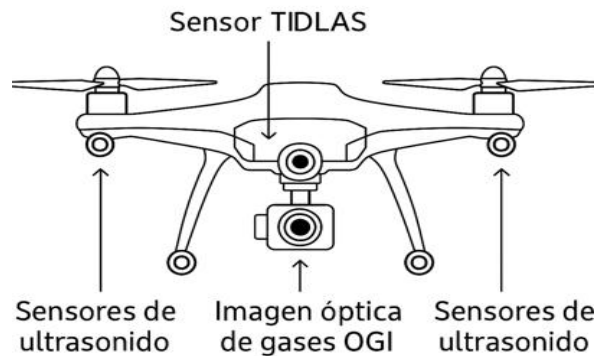
Sensor	Principio de detección	Alcance típico	Precisión	Ventajas principales
TDLAS	Absorción selectiva de láser infrarrojo (CH <sub>4</sub> ).	Hasta 30 m	Alta (desde 1 ppm)	Selectividad alta, medible, moderada resistencia al viento.
OGI	Imagen térmica de absorción infrarroja media.	Línea de visión	Media (visual)	Visualización inmediata, detección sin contacto, comprobación visual rápida.
Ultrasónico	Captación de ondas ultrasónicas generadas por fugas presurizadas.	< 15 m	Baja (cualitativo)	Opera en circunstancias ambientales desfavorables, no requiere líneas de visión directa.

*Nota.* Elaboración propia a partir de FLIR Systems (s.f.), Kwaśny y Bombalska (2023), Pergam-Suisse AG (s.f.), Ravikumar *et al.* (2017), Ravikumar *et al.* (2019) y Singh *et al.* (2023).

Adicionalmente, la Figura 4 expone una representación gráfica de un dron multirrotores común, en la que se indica la posición habitual de los sensores TDLAS, OGI y ultrasónicos.

**Figura 4**

*Ubicación típica de sensores en un dron multirrotores para la detección de gas metano*



*Nota.* Elaboración propia

Este tipo de disposición facilita la incorporación de los sensores estudiados en un dron o UAS:

- Sensor TIDLAS instalado en el lado frontal o inferior del dron, dirigido hacia el suelo o la línea de vuelo, para una cuantificación exacta.
- Cámara OGI, usualmente instalada en un gimbal estabilizado, lo que facilita la capturar imágenes térmicas desde diferentes ángulos.
- Sensor ultrasónico, instalado en lugares clave del armazón, beneficioso en ambientes presurizados o con turbulencia local.

### **3.3. Matriz de Evaluación Técnica de Sensores**

Para lograr una comparación técnica precisa entre los diferentes sensores estudiados, se utilizó una metodología cualitativa basada en criterios técnicos documentados en la literatura especializada (Tabla 14). La clasificación de precisión alta, media o baja tiene en cuenta varios factores: el límite de detección (ppm), la estabilidad de las mediciones durante el vuelo, la

frecuencia de falsas alarmas, el tiempo de respuesta del sensor, y la habilidad para cuantificar en tiempo real.

**Tabla 14**

*Criterios considerados para calificar la precisión*

Criterio técnico	Umbral o referencia	Nivel de precisión asignado
Límite de detección	$\leq 1$ ppm → Alta	Basado en especificaciones técnicas de sensores como TDLAS, OGI, Mox.
	2–50 ppm → Media	
	$>50$ ppm → Baja	
Estabilidad en la lectura	Capacidad de mantener valores sin grandes fluctuaciones en vuelo.	Alta si mantiene error $\leq \pm 5\%$ .
Tasa de falsos positivos/negativos	Baja tasa de error en campo ( $<10\%$ ) validada en estudios.	Alta si hay validación empírica sólida.
Respuesta en tiempo real	Tiempo de latencia $<5$ seg = Alta.	Cuanto menor la latencia, mayor la precisión funcional.
Capacidad de cuantificación	Si entrega datos medibles y no solo imágenes cualitativas.	Se considera alta si cuantifica concentraciones precisas.

*Nota.* Elaboración propia a partir FLIR Systems (s. f. c), Fox et al. (2019), Golston et al. (2018), Gorroño et al. (2021), Kwaśny y Bombalska (2023), Pergam-Suisse AG (s. f.) y Ravikumar et al. (2019).

Aplicando los criterios anteriores se diseñó la matriz de desempeño técnico (Tabla 15), permitiendo jerarquizar las tecnologías según su efectividad en la detección de CH<sub>4</sub>.

**Tabla 15**

*Matriz de desempeño técnico comparativo por sensor*

Criterio / Sensor	TDLAS	OGI	Ultrasonido
Precisión (Límite)	Alta ( $\leq 1$ ppm)	Media (visual)	Baja (Cualitativa)

Criterio / Sensor	TDLAS	OGI	Ultrasonido
Estabilidad operativa	Alta	Media	Media
Velocidad de respuesta	Alta (< 1 s)	Alta (visual)	Media
Capacidad de medida	Cuantitativa	Cualitativa / Visual	Cualitativa
Calificación Global	Alta	Media	Baja

*Nota.* Elaboración propia a partir de la síntesis de parámetros definidos en la Tabla 14.

Después de examinar a detalle los sensores estudiados, es importante expandir la visión hacia una comparación global entre el uso de drones y los métodos tradicionales de detección de fugas de gas (Tabla 16). Esta comparación incluye factores operativos importantes como el tiempo de respuesta, la sensibilidad del sistema, el costo de implementación y mantenimiento, además del grado de exposición al peligro del personal que realiza la operación. Los principales indicadores se han tomado de literatura técnica y casos documentados:

**Tabla 16**

*Comparación de indicadores clave entre métodos tradicionales y UAS para detección de fugas de CH<sub>4</sub>*

Indicador	Drones (UAS con sensores)	Métodos tradicionales (OGI manual, portátiles, fijos, visual)
Tiempo de respuesta	~10–60 min completo por área.	1–3 h por sitio, requiere personal in situ
Sensibilidad	< 1 ppm (TDLAS, Lindar); ~0.8 ppb/s precision (mapping).	~10–50 ppm para OGI manual; portátiles ≈1 ppm con contacto
Cobertura por día	5–10 km <sup>2</sup> (ala fija) o múltiples puntos en planta.	1–2 h por jornada manual
Costos operativos	US \$300–800/día (flota básica, múltiples vuelos; estudio 2021).	OGI manual ~\$1 200/día (operador + equipo)
Riesgo humano	Bajo (operador a distancia).	Alto (acceso directo, altura, químicos)

Indicador	Drones (UAS con sensores)	Métodos tradicionales (OGI manual, portátiles, fijos, visual)
Falsas alarmas	< 5 % (áreas ventiladas, calibración continua).	10–15 % sin calibración apropiada
Reducción efectiva de emisiones	Hasta 64% de reducción en emisiones por fugas en proyectos piloto 4	Variable: depende de frecuencia y cobertura

*Nota.* Elaboración propia a partir de Bolek et al. (2026), FLIR Systems (s. f. c), Fox et al. (2019), Golston et al. (2018), Gorroño et al. (2021), Pergam-Suisse AG (s. f.), Ravikumar et al. (2017) y Ravikumar et al. (2019).

El análisis comparativo evidenció que los drones equipados con sensores como TDLAS y OGI ofrecen ventajas operativas, ambientales y económicas significativas frente a los métodos convencionales de detección de fugas de gas metano, como inspecciones visuales, cámaras FLIR portátiles y sensores fijos.

Casos documentados con drones registraron límites de detección de metano de hasta 2 kg/h en condiciones de liberación del gas controlada (Gorroño et al., 2021); el uso de plataformas UAS aumenta la cobertura temporal y espacial significativamente frente a métodos tradicionales de monitoreo (Bolek et al., 2026). En Alberta, simulaciones de programas con sensores cuantitativos mostraron una reducción potencial en el volumen acumulado de emisiones por fugas en comparación con programas de inspección convencionales con OGI (Alberta Energy Regulator, 2021; SeekOps Inc., 2022).

### 3.4. Criterios de Selección Tecnológica

La elección de la tecnología UAS está determinada por el contexto operativo y el propósito de la inspección, según los indicadores técnicos y operativos analizados previamente. La Tabla 17 clasifica el uso de cada sensor según su valor agregado al sector energético. Se

establecieron criterios de ponderación para seleccionar la tecnología ideal, se fundamentaron en la exigencias operativas del sector: destacando la capacidad para detectar (sensibilidad), la autonomía de vuelo con carga útil y la trazabilidad de datos.

**Tabla 17**

*Matriz de selección de sensores según escenario operacional*

Escenario operacional	Tecnología recomendada	Criterio de selección
Cuantificación exacta en puntos críticos (Válvulas, Bidas)	TDLAS (Laser Methane Mini)	Alta selectividad al CH <sub>4</sub> y precisión en lecturas ppm*m.
Escaneo rápido de grandes facilidades (Baterías, Estaciones)	OGI Aérea (Cámaras FLIR G-Series)	Visualización en tiempo real de nubes de gas en áreas extensas.
Monitoreo preventivo en activos con acceso limitado	Ultrasonido (Sensores acústicos)	Detección omnidireccional sin necesidad de línea de visión directa.
Inspección de largo alcance (Líneas de flujo en zonas boscosas)	TDLAS (UAV LiDAR / Falcon)	Capacidad de detección a alturas superiores a 50 m.

*Nota.* Elaboración propia a partir de la síntesis de indicadores técnicos y operativos presentados en las Tablas 5 a 15 de la presente investigación.

Tomando en cuenta los criterios técnicos que se han examinado, se seleccionó el sistema Laser Falcon (tecnología TDLAS) y FLIR G-Series (tecnología OGI) como base tecnológica preliminar. Esta elección se basa en el análisis anterior de sus habilidades: el sensor Laser Falcon destaca por su selectividad química y su reducida masa (0.450 kg) lo que optimiza la autonomía de vuelo, y la cámara FLIR GF77, que posibilita observar nubes de gas cualitativamente en tiempo real a través de tecnología infrarroja. Para su integración se eligió el

sistema DJI Matrice 350 RTK dada su amplia adopción en el sector por precisión y maniobrabilidad, para elaborar la evaluación operativa y financiera que se presenta en el Capítulo 3.

### **3.5. Alcance y Limitaciones del Análisis**

La evaluación técnica y operativa presentada se basa en informes institucionales y literatura científica los cuales fueron el fundamento del análisis comparativo. El estudio tiene un enfoque descriptivo y no experimental; por ende, la validez de los indicadores dependerá de los parámetros presentados en los casos estudio examinados. Se considera que la variabilidad climática de las cuencas colombianas es un elemento que afecta el desempeño real de los sensores.

En este contexto, los sistemas UAS se establecen como una posible herramienta estratégicas para reducir la emisión de CH<sub>4</sub> por fugas, mejorar la seguridad en el trabajo y satisfacer las normas de sostenibilidad. Para Colombia, la introducción de esta tecnología se presenta como una oportunidad de avanzar hacia operaciones energéticas más limpias y abriendo la posibilidad de que las empresas del sector energético obtengan incentivos fiscales y normativos.

## **4. Análisis Técnico–Económico y Tributario del Uso de Sistemas UAV Para Detección de Gas Metano CH<sub>4</sub>**

Los drones equipados con sensores especializados en la detección de CH<sub>4</sub> representan una alternativa técnica frente a los métodos tradicionalmente usados, según la literatura y casos estudiados. Sin embargo, para que esta tecnología pueda ser usada en la industria energética colombiana, resulta necesario analizar los elementos fiscales y económicos que apoyen su viabilidad fiscal y financiera



Etapa 3. Evaluación del impacto fiscal: Aplicación individual de los incentivos tributarios de las Leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021 (Excepción de IVA, deducción en renta, depreciación acelerada y reducción de aranceles).

- Supuestos y alcance: El análisis se llevará a cabo bajo el supuesto de que el proyecto tiene una certificación ante la UPME y que está limitado al contexto operativo del sector energético en Colombia, sin considerar las variaciones extremas de la tasa representativa del mercado (TRM) y del índice de precios al consumidor (IPC) más allá de las proyecciones estándar.

#### **4.2. Proyección del IPC**

Para llevar a cabo el análisis fiscal-económico, fue imprescindible definir un criterio que permitiera actualizar los valores vinculados a la inversión del sistema propuesto, considerando el cambio del poder adquisitivo a lo largo del tiempo. La inflación es una variable macroeconómica importante en los estudios financieros que se aplica a proyectos de inversión, pues afecta directamente en la viabilidad económica así como en la evaluación de los costos futuros.

El Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, s. f.), se encarga en Colombia de calcular y publicar el IPC, el cual se emplea como indicador oficial para calcular la variación promedio en los precios de una canasta representativa de bienes y servicios que los hogares consumen. Dado que muestra la tendencia general de la inflación en el país, este indicador es utilizado como punto de referencia para análisis económicos, actualizaciones de tarifas y ajustes contractuales. Como resultado, el IPC se utilizó como base macroeconómica para predecir como varían los costos relacionados con el uso del sistema de detección de gas CH<sub>4</sub> en Colombia.

El método de suavizamiento exponencial con tendencia (modelo de Holt) se empleó para calcular la conducta futura del IPC durante la investigación. Este modelo resulta eficiente para modelar series temporales que poseen tendencias pero no estacionalidad (Hyndman & Athanasopoulos, 2018). Como la información utilizada corresponde a datos anuales, no se incluyó un elemento estacional en la estimación.

El modelo utiliza dos parámetros de suavizamiento,  $\alpha$  (nivel) y  $\beta$  (tendencia), que tiene valores en el rango (0,1). Con el objetivo de lograr la máxima precisión, estos fueron optimizados por medio de la reducción de la suma de cuadrados del error (SSE) utilizando Solver de Excel, con el fin de alcanzar el mejor ajuste con los datos históricos.

El modelo de Holt sin estacionalidad se formula mediante las siguientes ecuaciones:

$$L_t = \alpha Y_t + (1 - \alpha)(L_{t-1} + T_{t-1}) \quad (1)$$

$$T_t = \beta(L_t - L_{t-1}) + (1 - \beta)T_{t-1} \quad (2)$$

$$\hat{Y}_{t+h} = L_t + hT_t \quad (3)$$

Donde  $\alpha$  y  $\beta$  son los parámetros de suavizamiento del modelo,  $Y_t$  corresponde al valor observado del IPC en el periodo  $t$ ,  $L_t$  representa el nivel suavizado,  $T_t$  la tendencia calculada.

A partir de la calibración del modelo, se proyectó el IPC para un periodo de quince años como escenario base macroeconómico para el análisis financiero del proyecto. El detalle completo de la proyección, incluyendo los cálculos realizados, se presenta en el Anexo A.

Los valores porcentuales del IPC proyectados para los primeros cinco años futuros correspondientes a la evaluación económica del proyecto se muestran a continuación en la Tabla 18.

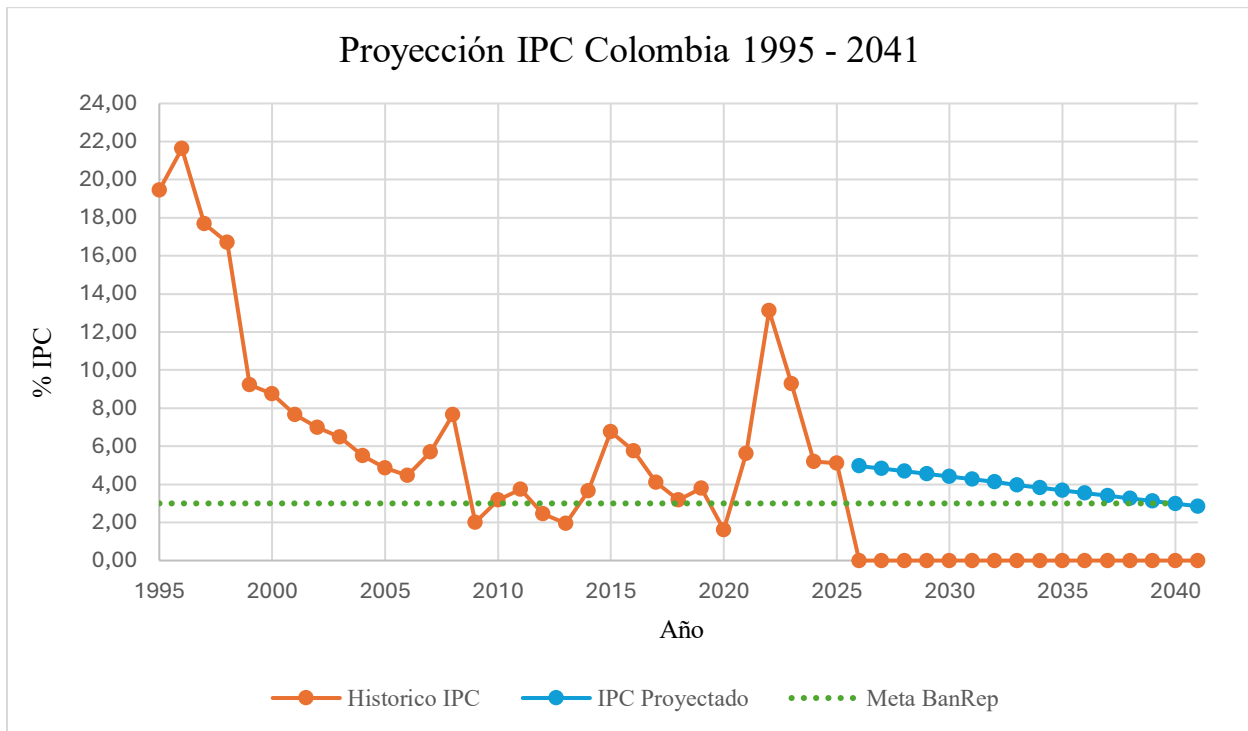
**Tabla 18***Proyección IPC para 5 años (2025-2030)*

Año	Pronóstico IPC (%)
2025	5.10
2026	4.96
2027	4.82
2028	2.68
2029	4.54
2030	4.40

*Nota.* Elaboración propia con base en series históricas del Departamento Administrativo

Nacional de Estadística (DANE, s. f.) y proyecciones del modelo de Holt.

En la Figura 5 se muestra la serie histórica del IPC (1995–2025) según datos reportados por el DANE, y utilizando el modelo Holt sin estacionalidad, se proyecta hasta el año 2041. El objetivo de inflación a largo plazo del Banco de la República, establecido en un 3% con un margen de tolerancia de  $\pm 1$  punto porcentual, es utilizado como referencia para contextualizar la convergencia del escenario proyectado (Banco de la República, 2024).

**Figura 5***Proyección del IPC bajo modelo Holt sin estacionalidad (1995-4041)*

*Nota.* Elaboración propia con base en datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, s. f.) y el Banco de la República (2024).

Los resultados indican una tendencia decreciente y convergente hacia niveles próximos a la meta de inflación a largo plazo establecida por el Banco de la República, lo cual apunta a un escenario de estabilización macroeconómica a mediano plazo. Como supuesto fundamental para la revisión de costos en el modelo financiero del proyecto, se adopta así mismo esta conducta.

#### **4.3. Determinación del Sistema Tecnológico Óptimo**

La elección del dron ideal para integrar el sensor de detección de fugas de gas metano se llevó a cabo teniendo en cuenta criterios técnicos y operacionales, así como la capacidad de carga útil (payload) de cada dron, que se refiere a la máxima cantidad de peso que una aeronave no tripulada puede llevar sin comprometer la seguridad de su operación (Austin, 2010).

Previamente, se consideró el uso de un dron multirrotor industrial, como el DJI Matrice 350 RTK, ya que es una plataforma muy utilizada en las operaciones de inspección técnica. No obstante, cuando se estudió la integración del sistema de detección óptica de gases (OGI), concretamente la cámara FLIR GF77, y se comprobó que el peso total del sensor, el lente especializado y el sistema de estabilización a través de un gimbal sobrepasaba el límite máximo de carga útil declarada por el fabricante (DJI, 2023). Dado que son equipos que necesitan estabilizarse y orientarse con precisión durante la inspección, este tipo de cámaras resulta indispensable la incorporación de un gimbal.

Por otro lado, los sensores que utilizan la tecnología Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS), que se emplean a menudo en sistemas detectores de metano por láser (LMD, por sus siglas en inglés), tienen un peso mucho más bajo y no necesitan un sistema de estabilización. Esto hace posible su incorporación en plataformas multirrotor estándar sin afectar el límite de carga útil. Esta discrepancia estructural incentivó la propuesta de dos configuraciones tecnológicas distintas: un dron multirrotor industrial típico en estos procedimientos equipado con sensor LMD, y una plataforma tipo heavy-lift para asegurar que el sistema OGI sea operativo.

**Tabla 19**

Comparación técnica de plataformas evaluadas

Configuración dron + sensor	Máx. Payload (kg)	Carga requerida Camara OGI FLIR GF77 + Lente LR (Kg)	Carga requerida TDLAS Sensor Falcon - LMD (Kg)	Resultado
DJI Matrice 350 RTK + Gimbal Gremsy H16	2.7	4.04	-	No viable
DJI Matrice 350 RTK + Gimbal Gremsy T7	2.7	3.70	-	No viable

Configuración dron + sensor	Máx. Payload (kg)	Carga requerida Camara OGI FLIR GF77 + Lente LR (Kg)	Carga requerida TDLAS Sensor Falcon - LMD (Kg)	Resultado
DJI FlyCart 30 + Gimbal Gremsy H16	30	5.058	-	Viable
DJI Matrice 350 RTK	2.7	-	0.450	Viable

*Nota.* Elaboración propia con base en las especificaciones técnicas del fabricante DJI Enterprise (s. f.) para las plataformas Matrice 350 RTK y FlyCart 30, así como en las fichas técnicas de integración de cargas útiles para sistemas multirrotor industriales.

Como muestra la Tabla 19, aunque la configuración disminuyera en peso por el cambio de gimbal, el sistema OGI excede la capacidad máxima de carga útil del DJI Matrice 350 RTK. Por el contrario, la plataforma DJI FlyCart 30 tiene un margen estructural adecuado para incorporar el sensor, el sistema óptico y el mecanismo de estabilización sin sobrepasar los límites operativos establecidos por el fabricante (DJI Enterprise, 2023). Desde un punto de vista técnico, el dron tipo heavy-lift garantiza que el sistema OGI completo sea estructuralmente viable con cualquier gimbal.

Así, la selección tecnológica realizada es el fundamento técnico para el posterior análisis tributario y económico.

Las especificaciones técnicas completas de las plataformas y sensores evaluados, así como los cálculos detallados de payload, fichas y documentación técnicas de soporte, se presentan en el Anexo B: Especificaciones técnicas y cálculos de payload.

#### **4.3. Aplicación de Beneficios Tributarios y Análisis del Impacto Económico**

Se inicia el análisis del impacto de los incentivos tributarios mencionados en el Capítulo 1 sobre el costo real de inversión (CAPEX), tras confirmar la viabilidad técnica de las configuraciones estudiadas.

En el marco colombiano, se pueden acceder a los siguientes beneficios al comprar tecnologías destinadas a detectar y reducir emisiones de gas metano, estos incentivos no son acumulativos entre sí para un mismo bien, eso quiere decir que se debe evaluar y seleccionar el beneficio que optimice de mejor manera su rentabilidad e inversión:

- Deducción en el impuesto sobre la renta hasta el 50% de la cantidad invertida en los equipos, en un periodo máximo de quince años. Esta deducción no se puede aplicar en un único periodo gravable; la cantidad deducible cada año no puede exceder el 50% de la renta líquida del ejercicio fiscal correspondiente.
- La compra de equipos de medición y monitoreo destinados a la gestión y control eficiente de recursos energéticos, así como reducir emisiones puede acceder a la exclusión del IVA.
- Exoneración o disminución de aranceles para maquinaria importada.
- Depreciación acelerada de hasta un 33,3% por año de los equipos comprados, lo que significa que el equipo se termina de depreciar en su totalidad en 3 años.

El uso de los incentivos tributarios identificados no altera el valor de la compra de los equipos; pero puede disminuir considerablemente el costo real del proyecto. Esto se debe a que disminuye la carga tributaria, ya sea en el desembolso inicial o en el tiempo necesario para recuperar fiscalmente la inversión, dependiendo del beneficio aplicable.

Según lo establecido por el Decreto 829 del año 2020 y las indicaciones emitidas por la UPME, los proyectos con aval tienen la posibilidad de solicitar ante la Dirección de Impuestos y

Aduanas Nacionales (DIAN) que se apliquen los incentivos tributarios relacionados con los bienes certificados. Por lo tanto, el estudio financiero realizado en esta investigación se organizó a través de escenarios individuales, analizando como cada beneficio podría verse reflejado en la reducción de la inversión inicial y la viabilidad económica del proyecto.

#### ***4.3.1. Estimación de la Inversión Inicial***

Los valores de inversión inicial necesaria para adquirir los sistemas de detección de gas metano evaluados, se adquirieron a partir de cotizaciones oficiales de fabricantes y distribuidores autorizados durante el periodo 2024-2025. Se utilizó un factor de ajuste del 20% para cubrir gastos relacionados con el transporte internacional, seguros, aranceles, IVA de importación y nacionalización del equipo de ser necesario, conservando así la coherencia metodológica entre componentes.

Para el sistema OGI se tomaron como componentes clave: plataforma DJI FlyCart 30, sensor FLIR GF77-25-LR especializado en detección de metano, gimbal Gremsy H16, accesorios de amortiguación y acople mecánico, así como costos proyectados de integración técnica.

Para el sistema TDLAS se optó por el bundle Laser Falcon methane detector, que es compatible con DJI Matrice 350 RTK (3D Mapping Tools, s. f.). Este incluye software y módulos de integración, lo cual disminuye los gastos adicionales de adaptación.

**Tabla 20**

*Estimación de la inversión inicial*

Componente	Sistema OGI (USD)	Sistema TDLAS (USD)
Plataforma (Dron)	(FlyCart 30) 26.818,00	(Matrice 350 RTK) 15.401,28
Sensor detector de CH <sub>4</sub>	(FLIR GF77-25-LR + 20%)	(Laser Falcon, + 20%)

Componente	Sistema OGI (USD)	Sistema TDLAS (USD)
	44.628,00	49.674,00
Gimbal	(Gremsy H16, +20%) 3.054,00	-
Servicios de ingeniería e integración (Adaptación física, eléctrica e instalación)	2.535,00	-
Total inversión estimada [USD]	77.035,96	65.075,28
TMR [COP/USD] PROM. 2025	4.052,86	4.052,86
Total inversión estimada + IVA [COP]	371.536.993,41	313.851.808,46

*Nota.* Elaboración propia a partir de cotizaciones comerciales suministradas por DJI, Drone Works Ireland, B&H Photo Video y 3D Mapping Tools para el periodo 2024-2025.

Para determinar el valor de depreciación de los equipos, se calculó el valor de salvamento, teniendo en cuenta como suele comportarse el mercado de drones profesionales y sensores de detección tipo industrial.

Se estimó un valor residual que representa el 20% del costo total del equipo para el sistema OGI y del 25% para el sistema TDLAS, teniendo en cuenta la estabilidad tecnológica superior y demanda operativa más alta de los sensores láser de medición remota. Estos porcentajes están incluidos dentro de los rangos que se utilizan habitualmente para calcular el valor de salvamento de activos industriales especializados, que puede variar entre un 10% y un 35% del costo inicial, en función de la vida útil y las condiciones operativas (Blank & Tarquin, 2018; Sullivan et al., 2015).

El valor neto y el valor neto depreciable usados en el análisis de depreciación acelerada y aplicación de beneficios tributarios, se estableció a partir de estos porcentajes. Los valores en detalle se presentan a continuación.

**Tabla 21***Estimación del valor de salvamento y base depreciable*

Concepto	OGI+ Dron [COP]	TDLAS + Dron [COP]
% Salvamento	20%	25%
Valor total de salvamento	62.443.192,17	65.935.253,88
Valor total de salvamento + IVA	74.307.398,68	78.462.952,11
Valor total neto depreciable	249.772.768,68	197.805.761,63
Valor neto depreciable + IVA	297.229.594,73	235.388.856,34

*Nota.* Elaboración propia a partir del modelo financiero y tributario detallado en el Anexo C.

Los valores netos depreciables, que se obtienen de la estimación del valor de los equipos, son el fundamento para aplicar el beneficio de depreciación acelerada del equipo, ya que con este sabemos nuestro límite para detener la depreciación antes de los 3 años estimados de ser necesario y así evitar una sobreestimación del gasto.

## 5. Resultados

Con el objetivo de calcular la reducción efectiva en los costos de inversión inicial y determinar cuál incentivo genera un mayor ahorro económico, se realizó una aplicación cuantitativa de los beneficios fiscales sobre los sistemas de detección de CH<sub>4</sub> evaluados.

El análisis incluyó la deducción del impuesto sobre la renta, la depreciación acelerada de los activos adquiridos, y la exclusión del IVA, además de la reducción de aranceles de importación. Cada beneficio se analizó de forma individual para las tecnologías TDLAS y OGI, utilizando como referencia los valores de inversión inicial proyectados en el modelo financiero.

La Tabla 22 muestra el ahorro potencial que representa cada incentivo.

**Tabla 22***Ahorro económico mediante aplicación de beneficios tributarios*

Concepto	Sistema OGI [COP]	Sistema TDLAS [COP]
Valor total del equipo + IVA	371.536.993,41	313.851.808,46
Valor neto depreciable + IVA	297.229.594,73	235.388.856,34
Ahorro en deducción en la declaración de renta a 50%	130.125.975,24	109.922.493,27
Ahorro en IVA	59.321.032,56	50.110.792,95
Ahorro en impuestos por aranceles	28.556.768,16	24.123.017,33
Ahorro en la depreciación acelerada a 33.33% (Potencial de gasto anual-Base del descuento)	94.743.427,27	75.031.381,08

*Nota.* Elaboración propia a partir del modelo financiero detallado en el Anexo C.

El gasto fiscal anual permitido sobre el activo que se encuentra en la Tabla 22 como un valor vinculado a la depreciación acelerada. Sin embargo este valor no representa un ahorro de dinero directo, sino la cantidad que la ley permite restar de las utilidades anualmente.

Para determinar el ahorro real, se calculó el impacto de dicho gasto sobre el impuesto de renta (35%), tal como se presenta en las Tablas 23 y 24.

**Tabla 23***Ahorro total por depreciación acelerada del activo OGI + Dron multirrotor*

OGI + Dron Multirrotor (Heavy lift)	Con depreciación [COP]	Sin depreciación [COP]
Renta gravable	297.229.594,73	297.229.594,73
Gasto depreciación	94.743.427,27	-
Renta líquida gravable	202.486.167,46	297.229.594,73
Impuesto sobre la renta 35%	70.870.158,61	104.030.358,15
Ahorro final por depreciación acelerada	33.160.199,54	

*Nota.* Elaboración propia a partir del modelo financiero detallado en el Anexo C.

**Tabla 24**

*Ahorro total por depreciación acelerada del activo TDLAS + Dron multirrotor*

TDLAS + Dron Multirrotor	Con depreciación [COP]	Sin depreciación [COP]
Renta gravable [COP]	235.388.856,34	235.388.856,34
Gasto depreciación [COP]	75.031.381,08	-
Renta líquida gravable [COP]	160.357.475,26	235.388.856,34
Impuesto sobre la renta 35% [COP]	56.125.116,34	82.386.099,72
Ahorro final por depreciación acelerada	26.260.983,38	

*Nota.* Elaboración propia a partir del modelo financiero detallado en el Anexo C.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la deducción del 50% en el impuesto sobre la renta se consolida como el incentivo con mayor impacto para la reducción del costo efectivo de la inversión a largo plazo para ambos sistemas. No obstante, cuando se elimina el pago del IVA se obtiene un beneficio directo en el flujo de caja, optimizando la viabilidad de proyectos con restricciones de liquidez inicial.

Este resultado demuestra que, a pesar de que los beneficios tributarios no alteran el valor comercial de compra de los equipos, ejercen un efecto positivo en la recuperación económica de la inversión al disminuir la carga fiscal asociada. Desde el punto de vista económico, estos incentivos incrementan la factibilidad técnica y económica de las tecnologías de monitoreo de emisiones, facilitando la transición hacia soluciones que potencian la eficiencia operacional.

## 6. Conclusiones

- El estudio de la normativa colombiana demuestra que el uso de UAS para detectar gas metano tiene un sólido y positivo apoyo legal y tributario. La operatividad se rige por la

Resolución 04201 de 2018 (RAC 91), mientras que la validez técnica del monitoreo se sustenta en la Resolución 40317 de 2023 para fugas  $\geq 500$  ppm. La viabilidad financiera se sustenta mediante las leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021, alineando la tecnología con los objetivos de eficiencia energética y descarbonización definidos en el PAI-PROURE 2022-2030.

- Los resultados del análisis comparativo indican que el uso de sistemas UAS ofrece una superioridad analítica frente a los métodos tradicionales, alcanzando sensibilidades de 1 ppm, lo que representa una mejora significativa frente a rangos de 100-500 ppm de los métodos manuales. Operativamente, esta capacidad se traduce en un aumento del 500% en cobertura lineal. Estos datos permiten una reducción de 60% en los tiempos de respuesta y una mitigación de emisiones de hasta 64%. Desde el enfoque de seguridad industrial, esta tecnología elimina la necesidad de exposición del personal en áreas de alto riesgos operativo.

- De acuerdo con el análisis financiero y técnico efectuado, el uso de tecnologías UAS para identificar fugas de gas metano en Colombia es viable gracias a los incentivos tributarios que disminuyen la barrera económica inicial. Se determinó en que el sistema TDLAS se establece como la opción más versátil y eficiente en costos al ser compatible con drones multirrotores industriales estándar, sin requerir adaptaciones estructurales o sistemas UAS heavy lift.

- La investigación demostró que escoger un beneficio tributario de las leyes 1715 de 2014 y 2099 de 2021, a pesar de ser único y no acumulable por activo, incrementa significativamente la tasa de recuperación económica. La estrategia de las empresas operadoras deberá ser acorde con su situación financiera: **si se tienen rentas líquidas elevadas**, se recomienda aplicar la deducción del 50% en renta, lo que genera un ahorro del **35%** de la inversión (\$109.9 millones de COP). Por otro lado, si el objetivo es **optimizar el flujo de caja inmediato**, las mejores

opciones son la exención de aranceles, que reduce el costo en 8% (\$24.1 millones de COP), o la exclusión de IVA, con un ahorro del 16% (\$50.1 millones de COP). Finalmente, **si el enfoque es la recuperación de activos**, la depreciación acelerada ofrece un ahorro fiscal anual del 8.5% (\$26.2 millones de COP) sobre el impuesto de renta, recuperando la inversión inicial por medio del ahorro de impuestos posterior a los 3 años en que se empieza a aplicar la depreciación. Estas normativas actúan como un catalizador para reducir la brecha financiera y alinear los compromisos nacionales de eficiencia energética y reducción de emisiones a nivel nacional con la rentabilidad empresarial.

## 7. Recomendaciones

- **Optimización de cargas útiles:** Se recomienda priorizar sensores que se han diseñado para ser integrados en drones (TDLAS), eludiendo las modificaciones experimentales que aumentan la masa total de despegue (MTOW) o los costos de integración ya que estas no garantizan una mejora en la autonomía de vuelo o la precisión analítica de la detección.

- **Descarte de sistemas ineficientes:** El empleo de sensores ultrasónicos como principal sistema en drones multirrotor no es recomendable, ya que el ruido aerodinámico generado por las hélices y las vibraciones mecánicas de los motores degradan significativamente la relación señal-ruido, comprometiendo la fiabilidad y la repetibilidad de la detección de fugas en entornos industriales.

- **Gestión estratégica de incentivos tributarios:** Se propone establecer cronogramas de monitoreo aéreo continuo no solamente para disminuir las pérdidas de producto, sino también como táctica esencial para optimizar el acceso a las ventajas tributarias de las Leyes 1715 y 2099, alineando la operación con los objetivos de descarbonización del país.

### Referencias Bibliográficas

- 3D Mapping Tools. (s. f.). *Laser Falcon methane Detector Bundle*.  
<https://3dmappingtools.com/products/laser-falcon-methane-detector-bundle>
- Alberta Energy Regulator. (2024). *Alternative fugitive emissions management program (Alt-FEMP) approvals*. <https://acortar.link/hpgx3T>
- Austin, R. (2010). *Unmanned aircraft systems: UAV design, development and deployment*. Wiley.
- Autronica Fire & Security. (2024). *AutroSonic acoustic gas detector kit, M25*.  
<https://acortar.link/NNuk2o>
- B&H Photo Video. (s. f.). *Gremsy H16 Ecofly gimbal*. <https://n9.cl/y9d86x>
- Banco de la República. (2024). *Política monetaria y cambiaria*.  
<https://www.banrep.gov.co/es/politica-monetaria-cambiaria>
- Benko, T., MacGregor, A., Wen, E., Fox, T. y Moorhouse, B. (2023). Continuous methane monitoring: Equivalency evaluation of regulator-approved alternative leak detection and repair program in Alberta, Canada. *SPE Production & Operations*, 38(03), 383–390.  
<https://acortar.link/SGPebO>
- Blank, L. y Tarquin, A. (2018). *Engineering economy* (8.a ed.). McGraw-Hill Education.
- Bolek, A., Beattie, M. N., Oliace, J. N., MacLeod, R., Skeeter, J., Morse, P., Heimann, M. y Göckede, M. (2026). Evaluation of UAV-based methods for quantifying methane point source emissions. *EGUsphere*. <https://acortar.link/pxaeQm>
- Bridger Photonics. (s. f.). *Gas Mapping LiDAR: methane detection & quantification*.  
<https://www.bridgerphotonics.com/solutions/gas-mapping-lidar-methane-detection>

- Center for Human Rights and Environment. (2019). *CEDHA Revela Emisiones Tóxicas en Sitios Petroleros de Colombia*. <https://acortar.link/GhrEzK>
- Chubb & FLIR. (s. f.). *Optical Gas Imaging: An Effective LDAR Method* [Informe técnico]. <https://acortar.link/hGb9AG>
- CO2Meter. (2026). *Fixed vs. portable gas detection: What's the Difference?* CO2Meter Blog. <https://www.co2meter.com/blogs/news/gas-detectors-fixed-vs-portable>
- Comisión de Regulación de Energía y Gas. (1999, 1 de junio). *Resolución 071 de 1999, por la cual se establece el Reglamento de Operación del Sistema Interconectado Nacional*. [https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion\\_creg\\_0071\\_1999.htm](https://gestornormativo.creg.gov.co/gestor/entorno/docs/resolucion_creg_0071_1999.htm)
- Congreso de la República de Colombia. (1993, 22 de diciembre). *Ley 99 de 1993, por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental, SINA y se dictan otras disposiciones*. <https://tinyurl.com/4ntpj86k>
- Congreso de la República de Colombia. (2012, 17 de octubre). *Ley Estatutaria 1581 de 2012, por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales*. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=49981>
- Congreso de la República de Colombia. (2021, 10 de julio). *Ley 2099 de 2021, por medio de la cual se dictan disposiciones para la transición energética, la dinamización del mercado energético, la reactivación económica del país y se dictan otras disposiciones*. <https://acortar.link/EKuVD8>

Corbett, A. y Smith, B. (2022). A study of a miniature TDLAS system onboard two unmanned aircraft to independently quantify methane emissions from oil and gas production assets and other industrial emitters. *Atmosphere*, 13(5), Artículo 804.

Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (s. f.). *Índice de precios al consumidor (IPC)*. <https://n9.cl/snt0pg>

DJI Enterprise. (s. f.). *Matrice 350 RTK: Specs*. <https://enterprise.dji.com/matrice-350-rtk/specs>

DJI Enterprise. (2023). *Matrice 350 RTK: Setting a new benchmark for the commercial drone industry*. <https://acortar.link/fRIJXG>

DJI Enterprise. (2024a). *DJI FlyCart 30 specs sheet*. <https://acortar.link/zaLmLm>

DJI Enterprise. (2024b). *DJI Matrice 350 RTK spec sheet*. <https://n9.cl/nisvl>

DJI. (s. f.a). *DJI Matrice 350 RTK — Worry-Free Basic Combo*. <https://dronesafestore.com/products/dji-matrice-350-rtk-worry-free-basic-combo>

DJI. (s. f.b). *FlyCart 30 technical specifications*. <https://www.dji.com/flycart-30/specs>

DJI. (2024). *FlyCart 30 uncrewed aircraft flight manual (V1.1)*. <https://www.dji.com/flycart-30/downloads>

Drone Works Ireland. (s. f.). *DJI FlyCart 30*. <https://n9.cl/g5uzj>

EagleNXT. (s. f.). *Drones*. <https://www.ageagle.com/ebee>

Ecopetrol S.A. (2022). *Reporte integrado de gestión sostenible 2021*. <https://acortar.link/5Twhd6>

Ecopetrol S.A. (2023a, 23 de marzo). *Ecopetrol se compromete a reducir sus emisiones de metano en un 55 por ciento a 2030*. <https://acortar.link/AjRSo7>

Ecopetrol S.A. (2023b, 1 de diciembre). *Ecopetrol logra reconocimiento “Gold Standard” por calidad de reporte de emisiones de metano*. <https://tinyurl.com/2h6zpjbp>

- Endress+Hauser. (2025). *Principles of tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS)*. Learning Center. <https://www.endress.com/en/support-overview/learning-center/TDLAS-measuring-principle>
- Environmental Defense Fund. (s. f.). *MethaneSAT: Home*. <https://www.methanesat.org>
- Fishburn, M. (2022). *Why autonomous drones with OGI cameras are changing the LDAR market*. Percepto. <https://acortar.link/o89nQd>
- FLIR Systems. (s. f.a). *FLIR GF77 LR uncooled optical gas imaging camera (Model 85208-0102)*. Global Test Supply. <https://n9.cl/blr2y>
- FLIR Systems. (s. f.b). *GF320 infrared camera for methane and VOC detection*. <https://www.flir.com/products/gf320/>
- FLIR Systems. (s. f.c). *The science behind optical gas imaging*. <https://acortar.link/t2BAPT>
- FLIR Systems. (2021). *Optical gas imaging: A guidebook for oil and gas professionals*. Teledyne FLIR. <https://acortar.link/5cHEo2>
- Forschungsgesellschaft für Energiewirtschaft. (2024, 25 de enero). *Global warming potential (GWP)*. <https://acortar.link/DXXYMF>
- Fox, T. A., Barchyn, T. E., Risk, D., Ravikumar, A. P. y Hugenholtz, C. H. (2019, 26 de abril). A review of close range and screening technologies for mitigating fugitive methane emissions in upstream oil and gas. *Environmental Research Letters*, 14(5), Artículo 053002. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-9326/ab0cc3>
- FT Technologies. (s. f.a). *Acoustic resonance wind sensors and anemometers for industrial applications*. <https://fttechnologies.com/>
- FT Technologies. (s. f.b). *Using drones for methane measurement*. Unmanned Systems Technology. <https://acortar.link/qTabco>

- Furuta, D., Sayahi, T., Li, J., Wilson, B., Presto, A. A. y Li, J. (2022). Characterization of inexpensive metal oxide sensor performance for trace methane detection. *Atmospheric Measurement Techniques*, 15, 5117–5128. <https://doi.org/10.5194/amt-15-5117-2022>
- Gålfalk, M., Páledal, S. N. y Bastviken, D. (2021). Sensitive drone mapping of methane emissions without the need for supplementary ground-based measurements. *ACS Earth and Space Chemistry*, 5(10), 2668-2676. <https://acortar.link/y5HQy9>
- Gewee. (s. f.). *Detectores fijos de gas* [Catálogo de producto]. <https://acortar.link/Tc9xzm>
- Golston, L. M., Aubut, N. F., Frish, M. B., Yang, S., Talbot, R., Gretencord, C., McSpirtt, J., Zondlo, M. A. y Herndon, S. C. (2018). Natural gas fugitive leak detection using UAV systems. *Atmosphere*, 9(9), 333. <https://www.mdpi.com/2073-4433/9/9/333>
- Gorroño, J., Inamdar, D. y Thorpe, A. K. (2021). Single-blind test of airplane-based hyperspectral methane detection via controlled releases. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(3), 2051–2067. <https://acortar.link/MkO3ZA>
- Gran Tierra Energy. (2021). *Informe de sostenibilidad 2021*. <https://www.grantierra.com/books/2021-esg-es/#page=1>
- Gremsy. (s. f.a). *Circular quick release*. <https://acortar.link/07onaq>
- Gremsy. (s. f.b). *Damping plate Pro 2.0 specification*. Gremsy Support & Documentation. <https://acortar.link/JFEVUD>
- Gremsy. (s. f.c). *Gremsy H16: Specs*. <https://acortar.link/jdTLYb>
- Hansen, A. y Ødegård, L. (2022). Offshore methane leak detection using optical gas imaging drones. *Journal of Marine Engineering*, 18(4), 245-258.

- Hinas, A., Roberts, J. M. y Gonzalez, F. (2017). Vision-based target finding and inspection of a ground target using a multirotor UAV system. *Sensors*, 17(12), 2929. <https://www.mdpi.com/1424-8220/17/12/2929>
- Hyndman, R. J. y Athanasopoulos, G. (2018). *Forecasting: Principles and practice* (3.a ed.). OTexts. <https://otexts.com/fpp3/>
- International Energy Agency. (2020). *Improving methane data*. <https://tinyurl.com/k7jmzjyu>
- International Energy Agency. (2021). *Methane Abatement - Tracking methane emissions from oil and gas operations*. <https://acortar.link/Xk5VYt>
- International Gas Detectors. (2022, 2 de agosto). *How portable gas detectors improve safety*. <https://acortar.link/3dFsQH>
- Interscan Corporation. (s. f.). *Unmatched precision in portable & fixed-point gas detection*. <https://gasdetection.com/>
- IPIECA y World Bank. (2018). *Flaring management guidance for the oil and gas industry*. <https://n9.cl/uu4h7>
- Kang, R., Liatsis, P. y Kyritsis, D. C. (2022). Emission quantification via passive infrared optical gas imaging: A review. *Energies*, 15(9), 3304. <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/9/3304>
- Kebir, A., Emadi, H., Eyinla, D. y Navaid, H. B. (2024). Methane detection using optical gas imaging: Passive infrared technology. *Journal of Energy Technologies and Policy*, 14(3), 65–87. <https://acortar.link/MGBY2E>
- Kizeo. (2023). *Cómo utilizar la inspección visual para optimizar la calidad y seguridad*. Kizeo Forms Blog. <https://www.kizeo-forms.com/lat/blog/inspeccion-visual/>

- Kon, T. E. (2024). The importance of the use of unmanned aerial vehicles (UAVs) in the oil and gas industry. *Petroleum Science and Engineering*, 8(2), 63–69. <https://acortar.link/bGIkaW>
- Kraidi, L., Al-Shammari, A. y Al-Habaibeh, A. (2024). A review of computer vision applications for asset inspection in the oil and gas industry. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 237, 100246. <https://acortar.link/oA15Kx>
- Kwaśny, M. y Bombalska, A. (2023). Optical methods of methane detection. *Sensors*, 23(5), 2834. <https://www.mdpi.com/1424-8220/23/5/2834>
- Liu, K., Wang, L., Tan, T., Wang, G. y Zhang, W. (2020). Standoff chemical detection using laser absorption spectroscopy: A review. *Remote Sensing*, 12(17), 2771. <https://www.mdpi.com/2072-4292/12/17/2771>
- Luecke, S. (2016). The pros and cons of portable gas detection: Understanding the technology leads to better safety. *The Synergist*, 27(4), 22–26. <https://publications.aiha.org/201604-pros-and-cons-of-portable-gas-detecti>
- Mella, P. (2025). Bridger Photonics adds drone capability to methane detection. *Midland Reporter-Telegram*. <https://tinyurl.com/378b29fp>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2020, 26 de noviembre). *Colombia reducirá en un 51% sus emisiones de gases efecto invernadero para el año 2030*. <https://acortar.link/bC1MKh>
- Ministerio de Minas y Energía. (2022a, 11 de febrero). *Resolución No. 40066 de 2022, por la cual se establecen los requisitos técnicos para la detección y reparación de fugas, el aprovechamiento, quema y venteo de gas natural durante las actividades de exploración y explotación de hidrocarburos*. <https://acortar.link/iD1gmi>

Ministerio de Minas y Energía. (2022b, 5 de mayo). *Resolución No. 40156 de 2022.*

<https://acortar.link/rc24ZP>

Ministerio de Minas y Energía. (2023, 25 de mayo). *Resolución No. 40317 de 2023.*

<https://acortar.link/vX1941>

Mine Safety Appliances. (2016). *Gassonic Observer-i Ultrasonic Gas Leak Detector* [Manual técnico]. <https://acortar.link/E4DQox>

Morsi, I. y Mostafa, M. M. (2012). Wireless gas detector system using microcontrollers, PLC and SCADA system for monitoring environmental pollution. *Applied Mechanics and Materials*, 249-250, 247–255. <https://www.scientific.net/AMM.249-250.247>

Mu, L., Yang, K., Feng, M., Mu, K., Jiao, M. y Li, L. (2024). Acoustic imaging method for gas leak detection and localization using virtual ultrasonic sensor array. *Sensors*, 24(5), 1366.

<https://www.mdpi.com/1424-8220/24/5/1366>

Naciones Unidas. (s. f.). *Sustainable Development Goal 13: Take urgent action to combat climate change and its impacts.* <https://acortar.link/hOxDRc>

OBW Technologies. (2023). *What is the difference between fixed and portable gas detection.*

<https://acortar.link/FREU3h>

Pergam-Suisse AG. (s. f.). *Laser Methane compact and portable methane gas detector.*

<https://pergam-suisse.ch/lmsmart>

Pergam-Suisse AG. (2021). *Laser Falcon Technical Specifications.* <https://n9.cl/dhpov>

Petroleum Technology Alliance Canada. (2024). *2024 Alberta Methane Field Challenge Summary.* <https://ptac.org/wp-content/uploads/2024/01/AMFC-Final-Report.pdf>

Ravikumar, A. P., Sreedhara, S., Wang, J., Neumann, J., Cowan, S., Anderson, A., Tosato, R., Picard, F., Vialard, J.-P., Giroud, F. y Brandt, A. R. (2019). Single-blind inter-

- comparison of methane detection technologies – results from the Stanford/EDF Mobile Monitoring Challenge. *Elementa: Science of the Anthropocene*, 7(1), 37. <https://acortar.link/xZ9Q2L>
- Ravikumar, A. P., Wang, J. y Brandt, A. R. (2017). Are optical gas imaging technologies effective for methane leak detection? *Environmental Science & Technology*, 53(1), 198–208. [https://ngi.stanford.edu/sites/ngi/files/media/file/acs.est\\_.6b03906-1.pdf](https://ngi.stanford.edu/sites/ngi/files/media/file/acs.est_.6b03906-1.pdf)
- Rodríguez, M. y Torres, J. (2025). *Ultrasonic Gas Leakage Detection*. ResearchGate. <https://acortar.link/DZj02x>
- SeekOps Inc. (2022, 3 de octubre). *Alberta Energy Regulator approves first unmanned aerial system for emissions management program*. <https://acortar.link/hpcS9F>
- Singh, A., Gopalkrishnan, H. P. y Panicker, M. R. (2023). *Gas leak detection using airborne ultrasonic sensors*. arXiv. <https://acortar.link/mDkV8L>
- Skopljak, N. (2025, 24 de febrero). *Equinor puts drones to work to survey methane emissions*. Offshore Energy. <https://tinyurl.com/2w6c3824>
- Smith, C. J. y Adendorff, K. (2012). Advantages and limitations of an automated visual inspection system. *South African Journal of Industrial Engineering Russo*, 5(1). <https://sajie.journals.ac.za/pub/article/view/423>
- Sniffer Robotics, Inc. (2022, 15 de diciembre). *US EPA Alternative Test Letter ALT-150: Approval of OTM-51 UAS application of Method 21 for landfill surface emissions monitoring*. <https://www.snifferrobotics.com/otm-51>
- Sullivan, W., Wicks, E. y Koelling, C. (2015). *Engineering economic analysis* (16.a ed.). Pearson.

Teledyne FLIR LLC. (s. f.). *FLIR G-series: Optical gas imaging (OGI) cameras.*

<https://www.flir.com/en-gb/products/flir-g-series/>

Teledyne FLIR. (s. f.a). *FLIR GF320: Infrared camera for gas leak detection and electrical inspections* [Ficha técnica]. <https://www.flir.com/instruments/optical-gas-imaging/gf320/>

Teledyne FLIR. (s. f.b). *Gas Find IR Series: FLIR GF77 uncooled optical gas imaging camera.*

<https://www.flir.com/instruments/optical-gas-imaging/gf77/>

Teledyne FLIR. (2021). *FLIR GF77 datasheet.* <https://acortar.link/QRbjXr>

TG Technical Services. (s. f.). *Stationary / fixed gas monitors.* <https://acortar.link/oM2AmJ>

U.S. Environmental Protection Agency. (s. f.). *Understanding global warming potentials.*

<https://acortar.link/KVuvWK>

U.S. Environmental Protection Agency. (2007). *Leak detection and repair: A best practices guide.* <https://www.epa.gov/sites/default/files/2014-02/documents/ldarguide.pdf>

U.S. Environmental Protection Agency. (2022). *EPA Issues Final Requirements for Using Optical Gas Imaging Leak Detection (Appendix K) Applied to Leak Detection Surveys at Natural Gas Processing Plants – Technical Fact Sheet.* <https://acortar.link/zH7bRL>

Unidad Administrativa Especial de Aeronáutica Civil. (2018, 27 de diciembre). *Resolución 04201 de 2018, por la cual se adiciona al Reglamento Aeronáutico de Colombia RAC 91, la norma técnica sobre la operación de sistemas de aeronaves no tripuladas.*

<https://acortar.link/g85JO4>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2022). *Plan de Acción Indicativo 2022 – 2030 para el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía (PAI-PROURE).*

<https://acortar.link/z68gVm>

Unidad de Planeación Minero Energética. (2023, 5 de julio). *Resolución N.º 000504 de 2023*.

[https://docs.upme.gov.co/Normatividad/504\\_2023.pdf](https://docs.upme.gov.co/Normatividad/504_2023.pdf)

Wanasinghe, T. R., Gosine, R. G., De Silva, O., Mann, G. K. I., James, L. A. y Warrian, P.

(2020). Unmanned Aerial Systems for the Oil and Gas Industry: Overview, Applications, and Challenges. *IEEE Access*, 8, 166980-166997.

[https://www.researchgate.net/publication/344003104\\_Unmanned\\_Aerial\\_Systems\\_for\\_the\\_Oil\\_and\\_Gas\\_Industry\\_Overview\\_Applications\\_and\\_Challenges](https://www.researchgate.net/publication/344003104_Unmanned_Aerial_Systems_for_the_Oil_and_Gas_Industry_Overview_Applications_and_Challenges)

Wang, Z., Fu, P. y Chao, X. (2019). Laser absorption sensing systems: Challenges, modeling, and design optimization. *Applied Sciences*, 9(13), 2723. [https://www.mdpi.com/2076-](https://www.mdpi.com/2076-3417/9/13/2723)

[3417/9/13/2723](https://www.mdpi.com/2076-3417/9/13/2723)

Xometry Europe. (2023). *Guía de diseño para mecanizado CNC* [Guía técnica].

<https://acortar.link/cbtq8w>

Zhou, Y. Z. (2024). Enhancement of methane detection based on filtered wavelength modulation spectroscopy using a TDLAS system. *Photonics*, 12(1), 2. [https://www.mdpi.com/2304-](https://www.mdpi.com/2304-6732/12/1/2)

[6732/12/1/2](https://www.mdpi.com/2304-6732/12/1/2)

## Apéndices

### Apéndice A

#### Proyección del IPC Mediante Modelo Holt (15 Años) Sin Estacionalidad

##### Base de Datos Utilizada

La serie histórica del índice de precios al consumidor (IPC) correspondiente al periodo 1995-2025 fue tomada del Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).

##### Tabla A1

*Datos históricos del Índice de Precios al Consumidor (IPC) en Colombia (1995-2025)*

Año	IPC (%)	Año	IPC (%)
1995	19,46	2012	2,44
1996	21,63	2013	1,94
1997	17,68	2014	3,66
1998	16,70	2015	6,77
1999	9,23	2016	5,75
2000	8,75	2017	4,09
2001	7,65	2018	3,18
2002	6,99	2019	3,80
2003	6,49	2020	1,61
2004	5,50	2021	5,62
2005	4,85	2022	13,12
2006	4,48	2023	9,28
2007	5,69	2024	5,20
2008	7,67	2025	5,10
2009	2,00		
2010	3,17		
2011	3,73		

*Nota.* Adaptado de *Índice de Precios al Consumidor (IPC) histórico*, por el Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE, s. f.).

### Proyección del IPC a 15 Años

Se aplicó el método de suavizamiento exponencial con tendencia (Holt sin estacionalidad), dado que la serie presenta comportamiento tendencial sin patrones estacionales.

Los parámetros estimados fueron:  $\alpha = 1,00$  /  $\beta = 0,15$  /  $SSE = 307,48$ . Dicha estimación se realizó mediante la minimización de la Suma de Cuadrados del Error (SSE) utilizando la herramienta Solver en Excel.

### Tabla A2

*Resultados de la proyección del IPC (1995-2041)*

Año	IPC (%)	Nivel (L)	Tendencia (T)	Pronóstico 1-paso	Residuo
1995	19,46	19,46	2,17	-	-
1996	21,63	21,63	2,17	21,63	0,00
1997	17,68	17,68	1,25	23,80	-6,12
1998	16,70	16,70	0,91	18,93	-2,23
1999	9,23	9,23	-0,35	17,61	-8,38
2000	8,75	8,75	-0,37	8,88	-0,13
2001	7,65	7,65	-0,48	8,38	-0,73
2002	6,99	6,99	-0,51	7,17	-0,18
2003	6,49	6,49	-0,51	6,48	0,01
2004	5,50	5,50	-0,58	5,98	-0,48
2005	4,85	4,85	-0,59	4,92	-0,07
2006	4,48	4,48	-0,56	4,26	0,22
2007	5,69	5,69	-0,29	3,92	1,77
2008	7,67	7,67	0,05	5,40	2,27
2009	2,00	2,00	-0,81	7,72	-5,72
2010	3,17	3,17	-0,51	1,19	1,98
2011	3,73	3,73	-0,35	2,66	1,07
2012	2,44	2,44	-0,49	3,38	-0,94
2013	1,94	1,94	-0,49	1,95	-0,01

Año	IPC (%)	Nivel (L)	Tendencia (T)	Pronóstico 1-paso	Residuo
2014	3,66	3,66	-0,16	1,45	2,21
2015	6,77	6,77	0,33	3,50	3,27
2016	5,75	5,75	0,13	7,10	-1,35
2017	4,09	4,09	-0,14	5,88	-1,79
2018	3,18	3,18	-0,26	3,95	-0,77
2019	3,80	3,80	-0,12	2,92	0,88
2020	1,61	1,61	-0,44	3,68	-2,07
2021	5,62	5,62	0,23	1,17	4,45
2022	13,12	13,12	1,33	5,85	7,27
2023	9,28	9,28	0,55	14,45	-5,17
2024	5,20	5,20	-0,15	9,83	-4,63
2025	5,10	5,10	-0,14	5,05	0,05
2026	-	-	-	4,96	-
2027	-	-	-	4,82	-
2028	-	-	-	4,68	-
2029	-	-	-	4,54	-
2030	-	-	-	4,40	-
2031	-	-	-	4,26	-
2032	-	-	-	4,12	-
2033	-	-	-	3,98	-
2034	-	-	-	3,84	-
2035	-	-	-	3,70	-
2036	-	-	-	3,56	-
2037	-	-	-	3,42	-
2038	-	-	-	3,28	-
2039	-	-	-	3,14	-
2040	-	-	-	3,00	-
2041	-	-	-	2,86	-

*Nota.* Datos históricos (1995–2025) adaptados del Departamento Administrativo Nacional de

Estadística (DANE, s. f.). Las proyecciones (2026–2041) son de elaboración propia mediante la

aplicación del modelo de suavizamiento exponencial de Holt, detallado en la metodología del presente estudio.

La calibración de los parámetros  $\alpha$  y  $\beta$  se realizó imponiendo las restricciones:  $0 < \alpha < 1$  y  $0 < \beta < 1$ . Minimizando la función objetivo correspondiente a la Suma de Cuadrados del Error (SSE) mediante Solver.

## Apéndice B

### Especificaciones Técnicas y Cálculos de Payload

La documentación técnica completa de los sensores, sistemas UAS y componentes mecánicos analizados en el estudio comparativo del capítulo 3 se presentan en el siguiente anexo.

#### Drones

##### *DJI FlyCart 30*

El dron DJI FlyCart 30 es una plataforma aérea de carga pesada, creado para el transporte logístico y operaciones industriales que requieren una alta exigencia y carga.

A continuación, se muestran las especificaciones técnicas importantes para el análisis de capacidad de carga:

#### Tabla B1

##### *Especificaciones técnicas – DJI FlyCart 30*

Dron DJI FlyCart 30 - Heavy-Lift (Especificaciones técnicas)	
Dimensiones desplegado (sin hélices)	2685 x 780 x 740 mm
Dimensiones desplegado (con hélices)	305 x 3055 x 740 mm
Distancia diagonal entre ejes	2575 mm
Peso sin baterías	42,5 kg
Peso con baterías TB65	65 kg
Peso máximo de despegue	95 kg
Tiempo máx. de vuelo (sin carga útil, condiciones ideales)	41 min
Altitud máx. de vuelo (con hélices 2110 s)	3000 m
Altitud máx. de vuelo (con hélices 2112 High-Altitude)	6000 m
Precisión de posicionamiento RTK	Vertical 0,1 m / Horizontal: 0,1 m

Dron DJI FlyCart 30 - Heavy-Lift (Especificaciones técnicas)	
Resistencia al viento	12 m/s
Índice de protección (IP Rating)	IP55
Rango de temperatura de operación	-20 °C a 45 °C
Máx. Payload (Carga útil)	30 kg

*Nota.* Especificaciones técnicas adaptadas de *DJI FlyCart 30 – Specs* (DJI Enterprise, 2024).

### ***DJI Matrice 350 RTK***

El DJI Matrice 350 RTK es un dron industrial multipropósito, diseñado para operaciones de inspección, cartografía y vigilancia técnico.

Las especificaciones técnicas completas consideradas en el análisis son las siguientes:

### **Tabla B2**

#### *Especificaciones técnicas – DJI Matrice 350 RTK*

Dron Matrice 350 RTK (Especificaciones técnicas)	
Dimensiones desplegado (sin hélices)	810 x 670 x 430 mm
Dimensiones desplegado (con hélices)	430 x 420 x 430 mm
Distancia diagonal entre ejes	895 mm
Peso sin baterías	≈ 3,77 kg
Peso con baterías TB65	≈ 6,47 kg
Peso máximo de despegue	9,2 kg
Tiempo máx. de vuelo (sin carga útil, condiciones ideales)	55 min
* Altitud máxima de vuelo (con hélices 2110s)	hasta 5000 m
Altitud máxima de vuelo (con hélices 2112 High-Altitude)	hasta 7000 m
Precisión de posicionamiento RTK	Horizontal 1 cm + 1 ppm / Vertical 1.5 cm + 1 ppm
Resistencia al viento	hasta 12 m/s
Índice de protección	IP55

Dron Matrice 350 RTK (Especificaciones técnicas)	
Rango de temperatura de operación	-20 °C a 50 °C
Máx. Payload	2,7 kg

*Nota.* Especificaciones técnicas adaptadas de *Matrice 350 RTK - User Manual* (DJI Enterprise, 2024).

## Sensores Detectores de Gas Metano CH<sub>4</sub>

### *Camara OGI - FLIR GF77*

La cámara FLIR GF77 corresponde a un sistema de detección óptica de gases (OGI, por sus siglas en inglés) diseñado para observar emisiones industriales de gases.

A continuación se detallan las especificaciones técnicas para su integración en una plataforma aérea:

### Tabla B3

#### *Especificaciones técnicas – FLIR GF77*

Sensor Camara OGI - FLIR GF77 + Lente Low-Range (LR) (Especificaciones técnicas)	
Resolución infrarroja	320 x 240 píxeles
Rango espectral lente LR	7 μm a 8,5 μm
Sensibilidad de gas (NECL) con lente LR	CH <sub>4</sub> : < 100 ppm*m (a ΔT = 10 °C, distancia = 1m)
NETD (sensibilidad térmica) con lente LR	< 25 mK a 30 °C
25°	
Campo de visión (FOV)	25° x 19°
Peso de la cámara con lente	≈ 1,54 kg (con batería)
Rango de operación de temperatura (En modo de detección térmica)	-20 °C hasta +70°C

*Nota.* Especificaciones técnicas adaptadas de *FLIR GF77: Cámara de imagen óptica de gas no refrigerada* (Teledyne FLIR, 2021).

**Sensor Falcon – Laser Methane Detector (LMD)**

El sensor Falcon LMD es un sistema de detección láser a distancia que mide las concentraciones de gas metano en la infraestructura energética.

A continuación se exponen las especificaciones tenidas en cuenta para su integración:

**Tabla B4***Especificaciones técnicas – Falcon LMD*

Sensor Falcon (Laser Methane Detector - LMD) (Especificaciones técnicas)	
Gas objetivo	Metano (CH <sub>4</sub> ) y gases similares de gas natural.
Límite de detección	1 - 50000 ppm*m
Distancia de detección	Hasta 50 m
Velocidad de detección	0,1 segundos
Tasa de muestreo	2 mediciones por segundo (5 puntos por dato)
Alimentación de energía	5 V / Potencia: ~7,5 W
Calibración	Auto calibración con célula de referencia integrada.
Clase láser	Luz guía (laser rojo): Clase 2. Luz de medida (infrarroja): Clase 1.
Rango de temperatura operativa	-17 °C a +50 °C
Dimensiones	100 x 82,5 x 80 mm
Peso	~ 0,250 kg para el sensor solo: hasta ~ 0,450 kg con kit completo.
Interfaz / Comunicación	RS-232C sobre USB para datos; con registro en tarjeta micro-SD.
Sincronización de tiempo	Sincronización automática mediante GPS / GLONASS
Seguridad ocular	Eye-Safe

*Nota.* Especificaciones técnicas adaptadas de *Laser Falcon + Pergam Data Logger – Technical Specifications* (Pergam-Suisse AG, 2021).

## Sistemas de Estabilización y Accesorios

### *Sistema Gimbal Gremsy H16*

El sistema Gremsy H16 corresponde a un gimbal industrial de alta capacidad creado con el objetivo de estabilizar sensores para la inspección aérea.

#### Tabla B5

##### *Especificaciones técnicas – Gremsy H16*

Especificaciones técnicas Gimbal Gremsy H16	
Peso en modo aéreo	≈ 2,2 kg
Peso listado general	≈ 2,6 kg
Capacidad de carga útil (Payload)	≈ 7,25 kg
Tipo de sistema	Estabilizador de 3 ejes
Entrada de voltaje	16,8 V
Dimensiones de montaje de cámara	200 mm x 195 mm x 55-200 mm
Run Time	6 horas

*Nota.* Especificaciones técnicas adaptadas de *Gremsy H16: Specs* (Gremsy, s.f.).

### *Accesorios Estructurales*

Placa de amortiguación (Damping Plate), adaptador CNC y adaptador Quick Release.

#### Tabla B6

##### *Especificaciones técnicas – Placa de amortiguación (Damping Plate)*

Especificaciones técnicas - Gremsy Damping Plate Pro2.0 (Adaptador)	
Peso	170 g
Diámetro de tubo compatible	12 mm
Rango de distancia entre tubos (ajustable)	137 mm - 169 mm
Material	Placa de aluminio ("lightweight, single aluminium plate")

---

 Especificaciones técnicas - Gremsy Damping Plate Pro2.0 (Adaptador)
 

---

Sistema de amortiguación	3 tipos de "silicone balls" (suave, media, dura)
Diseño de montaje	Está diseñada para rodillos dobles de 12 mm, típico en ciertos drones de estructura tipo Gryphon S1000, S900, M600

---

*Nota.* Especificaciones técnicas adaptadas de *Damping Plate Pro 2.0 – Especificaciones*

(Gremsy, s.f.).

### Tabla B7

#### *Especificaciones técnicas – Adaptador CNC*

---

 Especificaciones técnicas - Adaptador CNC personalizado
 

---

Material	Alumion 6061-T6: Buena relación resistencia - peso (material más común usado para este propósito).
Tolerancias dimensionales	≈0,05 mm (dependiendo del proveedor y diseño).
Procesos de mecanizado	Fresado CNC (3 ejes o 5 ejes), taladrado para tornillos de montaje, roscado si se necesita fijación.
Tamaño máximo de la pieza / grosor típico	Dependerá del diseño (3-10 mm puede ser un grosor adecuado para una placa estructural ligera).

---

*Nota.* Elaboración propia a partir de las propiedades mecánicas de la aleación de Aluminio 6061-

T6 y la *Guía de diseño para mecanizado CNC* (Xometry Europe, 2023).

### Tabla B8

#### *Especificaciones técnicas – Adaptador Quick Release*

---

 Especificaciones técnicas - Gremsy Circular Quick Release (H16) (Adaptador)
 

---

Peso	70 g
Dimensiones	65 mm x 60 mm x 20 mm

---

## Especificaciones técnicas - Gremsy Circular Quick Release (H16) (Adaptador)

Diseño

70 g

*Nota.* Especificaciones técnicas adaptadas de *Circular Quick Release – Especificaciones* (Gremsy, s.f.).

**Cálculos Detallados de Capacidad de Carga Útil (Payload)**

A continuación, se presentan los cálculos estructurales que se realizaron para verificar la posibilidad de integrar los detectores de gas metano en cada dron analizado.

Los cálculos se desarrollaron a través de una suma directa de masas y luego se comparó con el límite máximo Payload de cada dron especificado por el fabricante.

**Tabla B9**

*Cálculo Payload – Configuración DJI Matrice 350 RTK + OGI FLIR GF77 + Gremsy H16*

PAYLOAD OGI + Dron Multirrotor	
DJI Matrice 350 RTK	Máx. Payload: 2,7 kg
Sensor OGI: FLIR GF77 + Lente LR	1,54 kg
Gimbal: Gremsy H16	2,6 kg
Accesorios adicionales (Estimado cables)	0,4 kg
<b>Carga Total</b>	<b>4,04 kg</b>
Exceso de carga respecto al Payload máximo	2,70 - 4,04 = -1,34 kg

*Nota.* Elaboración propia a partir de los parámetros técnicos detallados en las Tablas B2, B3 y B5 del presente estudio.

Un valor negativo significa que la configuración excede la capacidad de carga útil máxima del dron, lo cual hace que la integración no sea viable desde el punto de vista operativo.

Los valores asociados a ítems de integración y accesorios adicionales que se tienen en cuenta en los cálculos de carga útil incluyen componentes requeridos para el ensamblaje del

sistema, como conectores eléctricos, módulos de regulación, cableado y elementos menores de fijación. Además, se calculó que el adaptador mecánico personalizado utilizado para fijar la cámara OGI y el gimbal fue estimado en 0,15 kg. Este valor fue obtenido mediante el cálculo volumétrico de una placa estructural hecha de aluminio 6061-T6 y la adición de márgenes relacionados con tornillería y refuerzos de montaje. Estas estimaciones se tomaron para representar las condiciones reales de integración e impedir que el peso total del sistema sea subestimado.

### Tabla B10

*Cálculo Payload – Configuración DJI Matrice 350 RTK + OGI FLIR GF77 + Gremsy T7*

PAYLOAD OGI + Dron Multirrotor	
DJI Matrice 350 RTK	Máx. Payload: 2,7 kg
Sensor OGI: FLIR GF77 + Lente LR	1,54 kg
Gimbal: Gremsy T7	1,86 kg
Accesorios adicionales (Estimado cables)	0,4 kg
<b>Carga Total</b>	<b>3,70 kg</b>
Exceso de carga respecto al Payload máximo	2,70 - 3,70 = -1 kg

*Nota.* Elaboración propia a partir de los parámetros técnicos de DJI, Teledyne FLIR y Gremsy, consolidados en las Tablas B2 y B3 del presente anexo.

### Tabla B11

*Cálculo Payload – Configuración DJI FlyCart 30 + OGI FLIR GF77 + Gremsy H16*

PAYLOAD OGI + Dron Multirrotor	
DJI FlyCart 30	Máx. payload: 30 kg
Sensor OGI: FLIR GF77 + Lente LR	1,54 kg
Gimbal: Gremsy H16	2,6 kg
Accesorios adicionales (Estimado cables)	0,4 kg

PAYLOAD OGI + Dron Multirrotor	
Adaptador (Damping Plate 2.0)	0,18 kg
Adaptador Release H16	0,128 kg
Adaptador CNC	0,15 kg
Carga Total	5,058 kg
Payload restante	30 - 5,058 = 24,942 kg

*Nota.* Elaboración propia a partir de los parámetros técnicos detallados en las Tablas B1, B3, B5, B6, B7 y B8 de los presentes anexos.

### Tabla B12

*Cálculo Payload – Configuración DJI Matrice 350 RTK + LMD Falcon*

PAYLOAD TDLAS + Dron Multirrotor	
DJI Matrice 350 RTK	Máx. Payload: 2,7 kg
Sensor Falcon (Laser Methane Detector - LMD)	0,450 kg
Carga Total	0,450 kg
Payload restante	2,7 - 0,450 = 2,25 kg

*Nota.* Elaboración propia a partir de los parámetros técnicos detallados en las Tablas B2 y B4 de los presentes anexos.

## Apéndice C

### Modelo Tributario-Financiero del Proyecto

El presente anexo presenta el modelo de cálculo empleado para la estimación del costo de inversión, la determinación del valor neto depreciable y la evaluación del impacto económico asociado a la aplicación de beneficios tributarios en sistemas UAV utilizados para la detección temprana de fugas de metano (CH<sub>4</sub>).

Las tablas incluidas corresponden a las hojas de cálculo desarrolladas para soportar cuantitativamente los resultados expuestos en el Capítulo 3.

### Supuestos Generales y Estimación de la Inversión Inicial del Modelo Financiero

Se realizó la estimación del costo total de inversión considerando el sensor óptico de detección de gases, la plataforma UAV, sistemas de estabilización, integración mecánica y costos de ingeniería necesarios para su operación aerotransportada.

#### Tabla C1

##### *Estimación de inversión inicial del sistema OGI + Dron multirrotor*

Servicios de ingeniería e integración (Adaptación física, eléctrica e instalación)	
Adaptación física y eléctrica [USD]	2.000,00
Adaptador Gremsy Damping Plat Pro 2.0 [USD]	265,00
Adaptador Gremsy Circular Quick Release (H16) [USD]	150,00
Adaptador CNC personalizado [USD]	120,00
Costo total de inversión	
Costos de integración (Gastos deducibles) [USD]	2265,00
Sensor FLIR GF77 [Cam. OGI + Lente Low-Range (LR)] [USD]	44628,00
Dron Multirrotor (DJI FlyCart30) [USD]	26818,96
Costo total del sistema [USD]	73711,96
TMR COP/USD PROM. 2025	4052,86
Valor total del equipo [COP]	298744254,21

IVA actual	19%
Valor total del equipo + IVA [COP]	355505662,50

*Nota.* Elaboración propia a partir de las cotizaciones comerciales y el análisis de costos detallado en la sección 3.3.1 del Capítulo 3 del presente estudio.

## Tabla C2

*Estimación de inversión inicial del sistema TDLAS + Dron multirrotor*

Costo total de inversión	
Sensor Falcon (Laser Methane Detector - LMD) [USD]	49674,00
Dron Multirrotor (DJI Matrice 350 RTK) [USD]	15401,28
Costo total del sistema [USD]	65075,28
TMR COP/USD PROM. 2025	4052,86
Valor total del equipo [COP]	263741015,51
IVA actual	19%
Valor total del equipo + IVA [COP]	313851808,46

*Nota.* Elaboración propia a partir de las cotizaciones comerciales y el análisis de costos detallado en la Sección 3.3.1 del Capítulo 3 del presente estudio.

A partir del costo total del sistema se determinó el valor de salvamento y el valor neto depreciable utilizado observados en la Tabla 21 como base para la aplicación de beneficios tributarios y depreciación acelerada.

### Aplicación de Beneficios Tributarios

Se evaluó la incidencia fiscal derivada de la aplicación de incentivos tributarios asociados a inversiones destinadas a la reducción de emisiones contaminantes y administración eficiente de los recursos energéticos.

Tabla C3

Aplicación de beneficios tributarios sobre el sistema OGI (2026 - 2034)

PROYECCIÓN IPC				4,96%	4,82%	4,68%	4,54%	4,40%	4,26%	4,12%	3,98%	3,84%	
AÑO				2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034	
				0	1	2	3	4	5		7	8	
<b>DEDUCCIÓN EN DECLARACIÓN DE RENTA [COP]</b>													
PORCENTAJE MÁXIMO PARA LA DEDUCCIÓN	50%												
DEDUCCIÓN EN RENTA NETO [COP]	149.372.127,10			<b>IMPUESTO RENTA - AHORRO A TRAVÉS DE LA DEDUCCIÓN [COP]</b>									
DEDUCCIÓN EN RENTA + IVA [COP]	177.752.831,25												
COSTO NETO [COP]				104631269,88	9958141,81	9958141,81	9958141,81	9958141,81	9958141,81	9958141,81	9958141,81	9958141,81	
COSTO NETO + IVA [COP]				124511211,15	11850188,75	11850188,75	11850188,75	11850188,75	11850188,75	11850188,75	11850188,75	11850188,75	
<b>[COP]</b>				56761408,30	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
<b>ARANCELES [COP]</b>													
FOB	X1	5%	14.937.212,71	29874425,42									
CIF: Envíos + Seguro + FOB	X2	2%	5.974.885,08										
	X3	3%	8.962.327,63										
<b>DEPRECIACIÓN ACELERADA [COP]</b>													
PORCENTAJE MÁXIMO PARA LA DEPRECIACIÓN ACELERADA	33,33%			<b>AHORRO EN IMPUESTO DE RENTA A TRAVÉS DE GASTOS [COP]</b>									
DEDUCCIÓN DE RENTA NETO				76180986,07	79657167,94	79657167,94	79657167,94	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
DEDUCCIÓN DE RENTA NETO + IVA				90655373,43	94792029,85	94792029,85	94792029,85	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

Nota. Elaboración propia a partir de los datos recopilados durante la investigación, proyecciones del IPC y la normativa tributaria vigente aplicada al proyecto (2025).

Tabla C4

Aplicación de beneficios tributarios sobre el sistema OGI (2035 - 2041)

PROYECCIÓN IPC				3,70%	3,56%	3,42%	3,28%	3,14%	3,00%	2,86%		
AÑO				2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041		
				9	10	11	12	13	14	15	TOTAL	
<b>DEDUCCIÓN EN DECLARACIÓN DE RENTA [COP]</b>												
PORCENTAJE MÁXIMO PARA LA DEDUCCIÓN		50%										
DEDUCCIÓN EN RENTA NETO [COP]		149.372.127,10		<b>IMPUESTO RENTA - AHORRO A TRAVÉS DE LA DEDUCCIÓN [COP]</b>								
DEDUCCIÓN EN RENTA + IVA [COP]		177.752.831,25										
COSTO NETO [COP]				9958141,81	9958141,81	9958141,81	9958141,81	9958141,81	958141,81	9958141,81	149372127,10	
COSTO NETO + IVA [COP]				11850188,75	11850188,75	11850188,75	11850188,75	11850188,75	11850188,75	11850188,75	177752831,25	
[COP]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	56761408,30	
<b>ARANCELES [COP]</b>												
FOB	X1	5%	14.937.212,71	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	29874425,42	
CIF: Envíos + Seguro + FOB		X2	5.974.885,08									
	X3	3%	8.962.327,63									
<b>DEPRECIACIÓN ACELERADA [COP]</b>												
PORCENTAJE MÁXIMO PARA LA DEPRECIACIÓN ACELERADA		33,33%		<b>AHORRO EN IMPUESTO DE RENTA A TRAVÉS DE GASTOS [COP]</b>								
DEDUCCIÓN DE RENTA NETO				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	238971503,82	
DEDUCCIÓN DE RENTA NETO + IVA				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	284376089,55	

Nota. Elaboración propia a partir de los datos recopilados durante la investigación, proyecciones del IPC y la normativa tributaria vigente aplicada al proyecto (2025).

Tabla C5

Aplicación de beneficios tributarios sobre el sistema TDLAS (2026 - 2034)

PROYECCIÓN IPC				4,96%	4,82%	4,68%	4,54%	4,40%	4,26%	4,12%	3,98%	3,84%
AÑO				2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033	2034
				0	1	2	3	4	5	6	7	8
<b>DEDUCCIÓN EN DECLARACIÓN DE RENTA [COP]</b>												
PORCENTAJE MÁXIMO PARA LA DEDUCCIÓN		50%										
DEDUCCIÓN EN RENTA NETO [COP]		131.870.507,76		<b>IMPUESTO RENTA - AHORRO A TRAVÉS DE LA DEDUCCIÓN [COP]</b>								
DEDUCCIÓN EN RENTA + IVA [COP]		156.925.904,23										
COSTO NETO [COP]				92371843,08	8791367,18	8791367,18	8791367,18	8791367,18	8791367,18	8791367,18	8791367,18	8791367,18
COSTO NETO + IVA [COP]				109922493,27	10461726,95	10461726,95	10461726,95	10461726,95	10461726,95	10461726,95	10461726,95	10461726,95
[COP]				50110792,95	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<b>ARANCELES [COP]</b>												
FOB	X1	5%	13.187.050,78	26374101,55	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CIF: Envíos + Seguro + FOB		X2	5.274.820,31									
	X3	3%	7.912.230,47									
<b>DEPRECIACIÓN ACELERADA [COP]</b>												
PORCENTAJE MÁXIMO PARA LA DEPRECIACIÓN ACELERADA		33,33%		<b>AHORRO EN IMPUESTO DE RENTA A TRAVÉS DE GASTOS [COP]</b>								
DEDUCCIÓN DE RENTA NETO				63051580,74	65928660,35	65928660,35	65928660,35	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
DEDUCCIÓN DE RENTA NETO + IVA				75031381,08	78455105,82	78455105,82	78455105,82	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Nota. Elaboración propia a partir de los datos recopilados durante la investigación, proyecciones del IPC y la normativa tributaria vigente aplicada al proyecto (2025).

Tabla C6

Aplicación de beneficios tributarios sobre el sistema TDLAS (2035 - 2041)

PROYECCIÓN IPC				3,70%	3,56%	3,42%	3,28%	3,14%	3,00%	2,86%		
AÑO				2035	2036	2037	2038	2039	2040	2041		
				9	10	11	12	13	14	15	TOTAL	
DEDUCCIÓN EN DECLARACIÓN DE RENTA [COP]												
PORCENTAJE MÁXIMO PARA LA DEDUCCIÓN			50%									
DEDUCCIÓN EN RENTA NETO [COP]			131.870.507,76	IMPUESTO RENTA - AHORRO A TRAVÉS DE LA DEDUCCIÓN [COP]								
DEDUCCIÓN EN RENTA + IVA [COP]			156.925.904,23									
COSTO NETO [COP]				8791367,18	8791367,18	8791367,18	8791367,18	8791367,18	8791367,18	8791367,18	131870507,76	
COSTO NETO + IVA [COP]				10461726,95	10461726,95	10461726,95	10461726,95	10461726,95	10461726,95	10461726,95	156925904,23	
[COP]				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	50110792,95	
ARANCELES [COP]												
FOB		X1	5%	13.187.050,78								
CIF: Envíos + Seguro + FOB		X2	2%	5.274.820,31	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26374101,55
		X3	3%	7.912.230,47								
DEPRECIACIÓN ACCELERADA [COP]												
PORCENTAJE MÁXIMO PARA LA DEPRECIACIÓN ACCELERADA			33,33%	AHORRO EN IMPUESTO DE RENTA A TRAVÉS DE GASTOS [COP]								
DEDUCCIÓN DE RENTA NETO				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	197785981,06
DEDUCCIÓN DE RENTA NETO + IVA				0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	235365317,46

Nota. Elaboración propia a partir de los datos recopilados durante la investigación, proyecciones del IPC y la normativa tributaria vigente aplicada al proyecto (2025).