



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD TECNOLÒGICA

SEDE VALLENAR

**INVESTIGACIÒN SOBRE LA DETECCIÒN DE ELEMENTOS
INCHANCABLES POR MEDIO DEL USO DE DRON CON SENSOR
MAGNETÒMETRO**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para obtener el título de
Técnico Universitario en Minas

Profesor Guía: Enrique Veragua Guerra

Ángel Villegas Godoy

Neil Villalobos Sierra

Jeremy Lillo Cubillos

Vallenar, Chile 2025

DEDICATORIA

Ángel Villegas

Agradezco a Dios por guiarme y darme la fuerza necesaria para alcanzar este logro tan significativo en mi vida, a mi familia por su amor incondicional, apoyo constante y palabras que siempre me motivaron a seguir adelante. Este logro no es solo mío, sino de todas las personas que me apoyaron.

Neil Villalobos

Agradezco a Dios por darme salud para completar mis estudios tan importantes en mi vida, a toda mi familia por su constante apoyo y motivación, especialmente a mi mama por sus palabras las cuales me motivaron a seguir y a no rendirme

Jeremy Lillo

Todo el trabajo realizado a lo largo de la carrera se lo debo principalmente a mi familia, a mi madre por su apoyo incondicional en momentos difíciles, agradecer a dios por la oportunidad de estudiar y volverme un profesional. También agradecer el apoyo de mis hermanas, motivándome a terminar y seguir continuando mis estudios. Y finalmente me agradezco a mí, por el esfuerzo empleado en esta etapa de mi vida por no rendirme y lograr titularme con esfuerzo y dedicación.

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, damos gracias a Dios por permitirnos tener una buena experiencia dentro de la universidad, gracias a la universidad por permitirnos ser unos buenos profesionales, agradecer a cada docente que hizo parte de este proceso, especialmente a nuestro profesor de cohorte Enrique Veragua, por la confianza y ayuda en nuestro proceso de titulación.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
INDICE DE FIGURAS.....	vii
INDICE DE TABLAS	viii
INDICE DE ECUACIONES	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT.....	xii
CAPITULO I: MARCO INTRODUCTORIO	13
1.1. Introducción.....	13
1.2. Objetivo general	14
1.3. Objetivos específicos.....	14
1.4. Planteamiento del problema	14
1.5. Antecedentes	15
1.6. Justificación.....	15
1.7. Alcance.....	16
CAPITULO II: MARCO TEORICO	17
2.1. Minería moderna	17
2.1.1. Innovación y modernización en el proceso de stockpiles en minería.	18
2.2. Magnetómetros	18
2.2.1. Tipos de magnetómetro.....	19
2.2.2. Magnetómetro de precesión de protones.....	19
2.2.3. Magnetómetro de efecto Overhauser	20
2.2.4. Magnetómetros de gas ionizado.....	21
2.2.5. Magnetómetro de compuerta de flujo	22

2.2.6. Magnetómetro SQUID	23
2.2.7. Magnetómetro de bobina de búsqueda.....	23
2.3. Vehículos aéreos no tripulado (UAV).....	24
2.3.1. Funcionamiento del dron.....	25
2.3.2. Características que determinan la compatibilidad de un dron con el sensor magnetómetro.....	25
2.3.3. Drones compatibles con el sensor magnetómetro	25
2.4. Evaluación de efectividad del magnetómetro.....	26
2.4.1. Elementos inchancables	27
2.4.2. Métodos tradicionales para la detección de elementos inchancables.....	27
2.5. Softwares utilizados para el análisis y recolección de datos	28
2.6. Funcionamiento del dron en conjunto con el sensor magnetómetro	29
2.7. Viabilidad económica en la implementación de tecnología en minería.	30
2.7.1. Costos relacionados del dron en conjunto con el magnetómetro	31
2.7.2. Costos de inversión inicial	31
2.7.3. Costos operativos	32
2.8. Beneficios económicos indirectos	32
2.8.1. Seguridad laboral	32
2.8.2. Sostenibilidad y responsabilidad social	33
2.8.3. Reducción de tiempo de trabajo.....	33
2.8.4. Reducción de personal	33
CAPITULO III: METODOLOGIA	34
3.1. Tipo de metodología.....	34
3.2. Carácter de la metodología.....	34
3.3. Procedimiento para la creación de la escala de clasificación de magnetómetros en el contexto minero	34

3.4. Analizar los drones compatibles con sensores magnetómetros a través de la creación de una tabla con especificaciones técnicas	37
3.5. Evaluación de la efectividad del magnetómetro frente a métodos tradicionales a través de una tabla comparativa.	39
3.5.1. Análisis de software utilizados en el sensor magnetómetro a través de una tabla comparativa.	41
3.6. Operación del dron equipado con el sensor magnetómetro en faenas mineras.	42
3.6.1. Detección de tipos de elementos inchancables con el dron equipado con el sensor magnetómetro en faenas mineras.	44
3.7. Viabilidad económica del dron equipado con el sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales	46
CAPITULO IV: ANALISIS E INTERPRETACION DE RESULTADOS	50
4.1. Resultados de la escala de clasificación de magnetómetros.....	50
4.2. Resultados del análisis de los drones compatibles con el sensor magnetómetro. .	52
4.3. Resultados de la evaluación de la efectividad del magnetómetro frente a métodos tradicionales.....	54
4.3.1. Resultados de los softwares utilizados con el sensor magnetómetro	56
4.4. Resultados sobre la operación del dron equipado con sensor magnetómetros en faenas mineras	58
4.4.1. Resultados sobre la detección de elementos inchancable en faenas mineras.	60
4.5. Resultados de la viabilidad económica del dron equipado con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales.	62
CAPITULO V: CONCLUSION	66
BIBLIOGRAFIA	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1, Tecnología innovadora en minería	16
Figura 2.2, Magnetómetro de precesión de protones	19
Figura 2.3, Magnetómetro de efecto Overhauser	20
Figura 2.4, Magnetómetro de compuerta de flujo	21
Figura 2.5, Magnetómetro SQUID	22
Figura 2.6, Magnetómetro de bobina de búsqueda	23
Figura 2.7, Dron de ala remota	23
Figura 4.1, Magnetómetro fluxgate y sus especificaciones técnicas	50
Figura 4.2, MagDrone R4 y sus especificaciones técnicas	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1, Descripción de los magnetómetros vectorial y escalar	18
Tabla 2.2, Características que determinan la efectividad	25
Tabla 2.3, Métodos tradicionales en la actualidad	27
Tabla 3.1, Evaluación de magnetómetros por medio de variables	34
Tabla 3.2, Escala de clasificación de los magnetómetros	35
Tabla 3.3, Análisis de las variables de los drones compatibles con el sensor	37
Tabla 3.4, Rubrica de evaluación de efectividad del dron con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales	39
Tabla 3.5, Evaluación de efectividad del dron con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales	40
Tabla 3.6, Evaluación de diversas características de softwares utilizados en sensor magnetómetro	41
Tabla 3.7, Paso a paso de la operación del dron equipado con el sensor magnetómetro	43
Tabla 3.8, Evaluación de la susceptibilidad magnética de diversos elementos inanchables	45
Tabla 3.9, Evaluación de la viabilidad económica del dron con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales	47
Tabla 4.1, Resultados de la escala de clasificación de los magnetómetros	49
Tabla 4.2, Resultados del análisis de las variables de los drones compatibles con el sensor magnetómetro	51
Tabla 4.3, Resultados de la evaluación de efectividad del dron con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales	53

Tabla 4.4, Resultados de la evaluación de diversas características de software utilizados en sensor magnetómetro	55
Tabla 4.5, Resultados del paso a paso de la operación del dron equipado con el sensor magnetómetro	58
Tabla 4.6, Resultados de la evaluación de susceptibilidad magnética de diversos elementos inchancables	59
Tabla 4.7, Resultados de la evaluación de viabilidad económica del dron con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales	61

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 2.1, Formula ROI	29
Ecuación 3.1, Formula ROI (reestructurada)	48
Ecuación 4.1, Resultados de datos y formula de ROI	62

RESUMEN

El objetivo del trabajo fue investigar la viabilidad y eficiencia del uso de drones equipados con sensores magnetómetro para la detección de elementos inchancables en stockpiles mineros.

El proyecto de investigación se organiza en cuatro capítulos. En el primer capítulo, se presenta la introducción, el planteamiento del problema, los objetivos específicos, antecedentes relevantes y el alcance de la investigación. Centrado principalmente en fuentes bibliográficas y en el contexto de la minería chilena.

El segundo capítulo aborda el marco teórico, indicando conceptos como la minería moderna, los tipos de magnetómetros (escalares y vectoriales), los drones compatibles (como MagDrone R1, R3 y R4), los diversos métodos tradicionales de detección que existen, los softwares de procesamiento (como UgCS, Oasis Montaj y SENSYS MAGNETO), el protocolo operativo del sistema dron-magnetómetro y la viabilidad económica mediante diversos costos y el retorno de la inversión (ROI).

El tercer capítulo se describe la metodología empleada, de tipo descriptiva y cuantitativa, basadas principalmente en el análisis comparativo de diversas fuentes bibliográficas y detallar los diferentes procedimientos para clasificar los magnetómetros, analizar drones, evaluar la efectividad frente a los métodos tradicionales, indicar el protocolo de operación y determinar la viabilidad económica.

En el cuarto capítulo se interpretan los diversos resultados; se identifica el magnetómetro de compuerta de flujo (Fluxgate) y al dron MagDrone R4 como las mejores opciones técnicamente más adecuadas. También se demuestra que el sistema dron-magnetómetro supero significativamente a los métodos tradicionales en precisión, cobertura, tiempo, seguridad y costo operativo.

Se determina una viabilidad económica firme, con un retorno de la inversión (ROI) altamente rentable de 114.6 %, lo que implicó identificar una recuperación de aproximadamente de diez meses.

DRONES – MAGNETOMETROS – ELEMENTOS INCHANCABLES – VIABILIDAD ECONOMICA.

ABSTRACT

The objective of the research was to investigate the feasibility and efficiency of using drones equipped with magnetometer sensors to detect uncrushable elements in mining stockpiles.

The research project was organized into four chapters. The first chapter presented the introduction, the problem statement, the specific objectives, relevant background information, and the scope of the research. It focused mainly on bibliographic sources and the context of Chilean mining.

The second chapter addressed the theoretical framework, indicating concepts such as modern mining, types of magnetometers (scalar and vector), compatibles drones (such as MagDrone R1, R3, and R4), the various traditional detection methods that exist, processing software (such as UgCS, Oasis Montaj, and SENSYS MAGNETO), the operating protocol of the drone-magnetometer system, and economic viability through various costs and return on investment (ROI).

The third chapter described the methodology used, which was descriptive and quantitative, based mainly on the comparative analysis of various bibliographic sources, and detailed the different procedures for classifying magnetometers, analyzing drones, evaluating effectiveness compared to traditional methods, indicating the operating protocol, and determining economic viability.

In the fourth chapter, the various results were interpreted; the fluxgate magnetometer and the MagDrone R4 drone were identified as the best and most technically suitable options. It was also demonstrated that the drone-magnetometer system significantly outperformed traditional methods in terms of accuracy, coverage, time, safety, and operating cost.

A solid economic viability was determined, with a highly profitable return on investment (ROI) of 114.6 %, which implied a payback period of less than ten months.

DRONES – MAGNETOMETERS – UNCHANGING ELEMENTS – ECONOMIC VIABILITY.

CAPÍTULO I: MARCO INTRODUCTORIO

1.1. Introducción

La industria minera chilena enfrenta desafíos constantes en la búsqueda de métodos más seguros y eficientes al realizar la detección de elementos inchancables en el subsuelo.

Inicialmente en el mundo de la minería los primeros dispositivos que eran utilizados para realizar estas detecciones de elementos inchancables eran los magnetómetros, posteriormente esto evolucionó a que cumplieran otras funciones y actualmente se complementó con la tecnología de drones que permite cubrir mayores áreas para detectar en una superficie de mayor tamaño. La detección precisa y eficiente es un problema que abarca a todas las mineras a nivel mundial, al optimizar los drones con sensor magnetómetro, se pueden crear nuevos métodos más accesibles y efectivos en la etapa de stockpiles en minería, lo que conlleva a una reducción de costos operativos y mejorar la sostenibilidad de las diferentes operaciones, además de una significativa mejora en la seguridad de los trabajadores y operaciones mineras. El presente trabajo busca corroborar las conclusiones de una anterior investigación sobre el uso de la tecnología de los drones con sensor magnetómetro, esta investigación busca confirmar esa hipótesis. Los resultados obtenidos en esta investigación dan cuenta del aspecto económico e innovador del uso de drones con sensor magnetómetro en contraposición del uso de otra tecnología. El problema investigado en el presente proyecto de titulación hace referencia a la eficiencia y viabilidad en la detección de elementos inchancables en el subsuelo con la utilización de drones con sensor magnetómetro. Enfocándose en diversos factores como el magnetómetro, los drones compatibles, los diferentes elementos inchancables que existen y en comparación con los métodos tradicionales. Para resolver la problemática se realizan estudios teóricos y análisis de datos donde se investigan los factores a resolver, además se presenta una motivación al realizar el estudio de poder contribuir con antecedentes que permitan modernizar los procesos de exploración minera, especialmente en el contexto de eficiencia y de sostenibilidad. También se propone apoyar a las pequeñas, medianas y grandes empresas mineras en la implementación de nuevas tecnologías y el uso de drones equipados con sensor magnetómetro.

1.2. Objetivo general

Investigar la viabilidad y eficiencia del uso de drones equipados con sensor magnetómetro para la detección de elementos inchancables en minería.

1.3. Objetivos específicos

- Explicar los tipos de magnetómetro que pueden detectar elementos inchancables para seleccionar los más adecuados según el contexto minero.
- Analizar los drones que son compatibles con el sensor magnetómetro para garantizar la precisión en la detección.
- Evaluar la efectividad del sensor magnetómetro en la detección de elementos inchancables para verificar su desempeño frente métodos tradicionales.
- Describir operación y funcionamiento del dron equipado con el sensor magnetómetro para facilitar el uso en faenas mineras.
- Determinar la viabilidad económica que genera el dron con el sensor magnetómetro en comparación de los métodos tradicionales para demostrar sus beneficios a largo plazo.

1.4. Planteamiento del problema

La detección de elementos inchancables, como diferentes objetos metálicos ocultos representan un gran desafío para diversos campos como la minería, arqueología y la gestión de recursos. Implica la paralización de obras y el deterioro de diferentes equipos utilizados en operaciones mineras. Los métodos tradicionales de búsqueda son costosos, ineficaces y requieren de una gran cantidad de tiempo para cumplir con su rol. ¿La implementación de drones equipados con sensor magnetómetro ofrece una mejor eficiencia y efectividad en la detección de diferentes elementos inchancables?

1.5. Antecedentes

La minería chilena ha generado un gran avance tecnológico con la utilización de drones aéreos para apoyar y mejorar algunas de las tareas fundamentales en minería, según Costa y Páez (2021) aporta en gran medida la recopilación de información valiosa en un corto periodo de tiempo que las operaciones tradicionales de recopilación de datos. En el contexto minero, Sernageomin ha señalado los diferentes incidentes que han ocurrido por la presencia no identificada de elementos inchancables, principalmente restos metálicos de perforación que provocan daños en los equipos y accidentes en los trabajadores, lo que impulsa a la búsqueda de métodos más eficaces y seguros. (sernageomin, 2024). En los últimos años, la integración de los drones equipados con sensor magnetómetro ha demostrado ser una alternativa prometedora. Empresas como GEM systems y estudios académicos (savkin, 2021) validaron que estos sistemas permiten detectar con alta precisión anomalías magnéticas generadas por elementos inchancables cercanas a la superficie, cubriendo áreas en poco tiempo y menor riesgo que los métodos tradicionales.

1.6. Justificación

La presente investigación tiene una importancia y necesidad relevante para la minería chilena, ya que aborda un problema crítico identificado en diferentes mineras: la presencia de elementos inchancables en stockpiles que generan daños a los equipos, paralizaciones operativas y riesgo en la seguridad de los trabajadores. El uso de dron con sensor magnetómetro representa una propuesta innovadora, tecnológica y eficiente para resolver el problema planteado, contribuyendo a la mejora de seguridad, eficiencia operativa y la sostenibilidad, apoyando el cambio hacia una minería más inteligente.

1.7. Alcance

La investigación se enfoca en la detección de elementos inchancables en zonas de stockpiles, utilizando dron de ala rotativa y magnetómetro de tipo vectorial y escalar. El presente informe se enfoca en la minería chilena, en cualquier faena del país que cuente con stockpiles. No se considerarán objetos no metálicos, ni tampoco se realizar pruebas o experimentos de campos, la investigación se basará exclusivamente en fuentes bibliográficas, el estudio se realiza en el año 2025, por lo que sus conclusiones están limitadas hasta la creación de nuevas y mejores tecnologías.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Minería moderna

La minería moderna del siglo XXI que se empieza a desarrollar en países del primer mundo como: Alemania, Estados Unidos, China y Rusia realizan un aprovechamiento racional de los recursos y además de la búsqueda de un mínimo impacto en el entorno, preservando la biodiversidad y la sociedad. Tiene características fundamentales como son el mínimo impacto ambiental que ejercen, la tecnología minera mejorada a través de los años, la innovación constante, el uso de la inteligencia artificial y la utilización de la automatización y robótica. También aporta en gran medida en la salud de los trabajadores, permitiendo un mejor bienestar laboral y finalmente ayudando en gran medida al medio ambiente al utilizar tecnologías menos contaminantes. (Cornejo, 2023).

Figura 2.1 Tecnología innovadora en minería.



Fuente: Robotia 2025

2.1.1. Innovación y modernización en el proceso de stockpiles en minería.

La tecnología está transformando la forma en que las empresas mineras gestionan sus operaciones, permitiendo la integración y el análisis de volúmenes crecientes de datos para tomar decisiones más rápidas, precisas y sostenibles. Desde los stockpiles hasta la planta de procesamiento, herramientas digitales como la inteligencia artificial y el uso de drones están transformando todo el ciclo de vida de la minería. Esta visión de una industria minera digital, sostenible y conectada se alinea con las necesidades estratégicas en la detección de elementos inchancables, que apunta cada vez más a la innovación y modernización en los stockpiles en minera (NME, 2025).

2.2. Magnetómetros

Un magnetómetro es un dispositivo especializado diseñado para medir la intensidad y la dirección de los campos magnéticos. También contiene diversas funciones y diseños, como detectar y medir áreas de magnetismo, localizar objetos metálicos y determinar la dirección y posición de objetos en relación con un campo magnético. Entre los usos más comunes que tiene se incluye la detección de objetos metálicos enterrados en yacimientos arqueológicos, la ayuda a la navegación, como las brújulas, y la asistencia en la exploración espacial mediante el estudio de los campos magnéticos de los cuerpos celestes. Otros magnetómetros pueden diseñarse para realizar funciones específicas según cómo miden y detectan la dirección de las fuentes de magnetismo. El concepto de magnetómetros se remonta a principios del siglo XIX, con contribuciones fundamentales de científicos como Carl Friedrich Gauss y Nikola Tesla, quienes exploraron y ampliaron las teorías magnéticas. (Ungvarsky, 2023).

2.2.1. Tipos de magnetómetro

Los magnetómetros según la empresa el procus (2013) se dividen en dos tipos básicos: escalares y vectoriales. Además, según señala la empresa el procus (2013), el magnetómetro escalar mide el valor escalar de la intensidad del flujo magnético con gran precisión. Se clasifican en magnetómetros de precesión de protones, de efecto overhaul y de gas ionizado. Un magnetómetro vectorial mide la magnitud y la dirección del campo magnético. Se dividen en varios tipos: de efecto Hall, de compuerta de flujo, de bobina de búsqueda, SQUID y SERF

Tabla 2.1 Descripción de los magnetómetros vectorial y escalar

Tipo de magnetómetro	Subtipos	Principio de operación	Adecuación para elementos inchancables
Escalares	Precesión de protones, Overhauser, Gas ionizado (cesio, rubidio)	Miden solo la magnitud del campo magnético total	Alta: ideales para detectar anomalías débiles generadas por objetos ferrosos pequeños en stockpiles mineros.
Vectoriales	Fluxgate, SQUID, Bobina de búsqueda, Efecto Hall	Miden magnitud y dirección del campo magnético	Limitada: SQUID es extremadamente sensible, pero requiere criogenia; fluxgate es robusto, pero menos preciso para detección de objetos pequeños a poca profundidad.

Fuente: El procus 2013

2.2.2. Magnetómetro de precesión de protones

Utiliza resonancia magnética nuclear (RMN) para medir la frecuencia de resonancia de los protones en un campo magnético. Se hace pasar una corriente continua polarizante a través de un solenoide, lo que crea un alto flujo magnético alrededor del combustible rico en hidrógeno, como el queroseno. Algunos de estos protones se alinean con este flujo. Al liberarse el flujo polarizante, la frecuencia de precesión de los protones hasta su realineación normal permite medir el campo magnético (procus, 2013).

Figura 2.2 Magnetómetro de precesión de protones



Fuente: geophysicsinstruments 2024

2.2.3. Magnetómetro de efecto Overhauser

Este método también funciona según el mismo principio de precesión de protones, pero en lugar del solenoide, se utiliza una señal de radiofrecuencia de baja potencia para alinear los protones. Cuando un líquido rico en electrones se combina con hidrógeno, se somete a una señal de radiofrecuencia (RF). Por efecto de reacondicionamiento, los protones se acoplan a los núcleos del líquido. La frecuencia de precesión es lineal con la densidad de flujo magnético y, por lo tanto, puede utilizarse para medir la intensidad del campo. Requiere menos energía y ofrece velocidades de muestreo más rápidas (procus, 2013).

Figura 2.3 Magnetómetro de efecto Overhauser



Fuente: El procus 2013

2.2.4. Magnetómetros de gas ionizado

Es más preciso que el magnetómetro de precesión de protones. Consta de un emisor de luz de fotones y una cámara de vapor llena de vapores como cesio, helio y rubidio. Cuando el átomo de cesio entra en contacto con el fotón de la lámpara, los niveles de energía de los electrones varían a una frecuencia que corresponde al campo magnético externo. Esta variación de frecuencia mide la intensidad del campo magnético (procus, 2013).

2.2.5. Magnetómetro de compuerta de flujo

Se utilizan para aplicaciones de alta sensibilidad. Un controlador de sensor de compuerta de flujo (fluxgate) utiliza una corriente alterna que alimenta un material de núcleo permeable. Consiste en un núcleo magnéticamente susceptible, enrollado por dos bobinas de alambre. Una bobina se excita con la alimentación de CA y el campo, en constante cambio, induce una corriente eléctrica en la segunda bobina. Esta variación de corriente se basa en el campo de fondo. Por lo tanto, el campo magnético alterno y la corriente de salida inducida estarán desfasados con respecto a la corriente de entrada. El grado en que esto ocurra dependerá de la intensidad del campo magnético de fondo (procus, 2013).

Figura 2.4 Magnetómetro de compuerta de flujo



Fuente: El procus 2013

2.2.6. Magnetómetro SQUID

Consiste en dos superconductores separados por finas capas aislantes que forman dos uniones paralelas. Son muy sensibles a los campos de baja intensidad y se utilizan con mayor frecuencia para medir los campos magnéticos producidos por el cerebro o el corazón en aplicaciones médicas (procus, 2013).

Figura 2.5 Magnetómetro SQUID



Fuente: SOTEQ 2025

2.2.7. Magnetómetro de bobina de búsqueda

Se basan en el principio de las leyes de inducción de Faraday. Consisten en bobinas de cobre enrolladas alrededor de un núcleo magnético. El núcleo se magnetiza mediante las líneas de campo magnético que se generan en el interior de las bobinas. Las fluctuaciones del campo magnético generan corrientes eléctricas, y el magnetómetro mide y registra las variaciones de voltaje debidas a estas corrientes (procus, 2013).

Figura 2.6 Magnetómetro de bobina de búsqueda



Fuente: El proCUS 2013

2.3. Vehículos aéreos no tripulado (UAV)

Un dron es un vehículo aéreo UAV (vehículo aéreo no tripulado) es decir que no transportan personas. Es un término amplio que se refiere a una aeronave que opera de forma autónoma o por control remoto, sin piloto a bordo. Su evolución ha permitido su utilización en diferentes áreas, aplicarse en múltiples funciones y permitiendo la realización de tareas difíciles, peligrosas o costosas de realizar por medios convencionales. (Apddrones, 2025)

Figura 2.7 Dron de ala remota



Fuente: SHP Engineering 2025

2.3.1. Funcionamiento del dron

Cuando se enciende el motor de un vehículo no tripulado (dron) el controlador de vuelo recopila datos de los sensores para mantenerlo estable. El piloto o el sistema de navegación autónoma envían comandos al controlador de vuelo a través de una conexión inalámbrica, indicando la dirección y la velocidad deseadas. (dron, 2025)

2.3.2. Características que determinan la compatibilidad de un dron con el sensor magnetómetro

Comúnmente para que un UAV sea compatible con los sensores magnetómetros, depende de tres factores importantes uno de ellos sería que este diseñado específicamente para el sensor, también que la carga pueda soportar el UAV y finalmente el sistema de navegación

El Por qué el UAV está diseñado específicamente para el sensor es porque es más fácil de ensamblar y más compatibilidad entre el UAV y magnetómetro, en tema de la carga es para no generar sobre esfuerzo al UAV y evitar daño en el proceso. El sistema de navegación es para detectar el fallo del sensor y para evitar errores en terrenos difíciles y evitar errores de cálculos. (navegation, 2018)

2.3.3. Drones compatibles con el sensor magnetómetro

Los UAV compatible con los sensores magnetómetros son variados, algunos de ellos pueden ser:

- SENSYS MagNIMBUS.
- SENSYS MagDrone R1.
- SENSYS MagDrone R3.
- SENSYS MagDrone R4.
- Geometrics MagArrow Mk2. (Geometrics, 2025)

2.4. Evaluación de efectividad del magnetómetro

En este dispositivo, la efectividad del magnetómetro no se puede determinar por un solo parámetro, sino por medio de un conjunto de especificaciones técnicas que permiten juzgar su desempeño en alguna aplicación específica, según Ripka (2021), las especificaciones fundamentales para evaluar la efectividad del magnetómetro serían el ruido del sensor (expresado en nT o nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$), la resolución, la estabilidad de offset, la linealidad, la inmunidad a interferencias ambientales (como vibración o variación de temperatura). En el contexto de la detección de elementos inchancables en stockpiles mineros, la efectividad del magnetómetro se evalúa teóricamente con una comparación entre la señal magnética esperada que pueda generar un objeto que conozcan su tamaño y profundidad con el nivel de ruido del sensor.

Si la anomalía magnética supera significativamente el ruido (relación señal-ruido mayor a 3), se considera que el magnetómetro es efectivo para la tarea asignada, además de su compatibilidad con dispositivos móviles como los drones, constituyen aún más a su efectividad en la viabilidad operativa frente a métodos tradicionales.

Tabla 2.2 Características que determinan la efectividad

Especificación	Definición técnica	Relevancia en detección de elementos inchancables
Ruido (Noise)	Fluctuaciones aleatorias en la salida del sensor en ausencia de campo. Se expresa en nT RMS o nT/ $\sqrt{\text{Hz}}$.	Determina la señal mínima detectable. Si el ruido > señal del objeto, no hay detección.
Resolución	Mínimo cambio en el campo magnético que el sensor puede distinguir. Depende del ruido y la electrónica.	Define la capacidad de identificar anomalías débiles generadas por fragmentos metálicos pequeños.
Offset y deriva (Offset & drift)	Valor de salida cuando B = 0; su variación con temperatura o tiempo.	Afecta la estabilidad de la medición durante vuelos prolongados. Deriva alta genera falsas anomalías.
Linealidad	Grado en que la salida del sensor es proporcional al campo aplicado en todo su rango.	Importante si se usan modelos cuantitativos (no solo detección binaria).
Ancho de banda (Bandwidth)	Rango de frecuencias que el sensor puede medir sin atenuación.	Determina la velocidad máxima de muestreo. En drones, afecta la densidad de datos por m ² .

Fuente: Ripka 2021

2.4.1. Elementos inchancables

Se llama Inchancables a cualquier material que, mezclado con el mineral extraído, puede dañar la maquinaria o en el peor de los casos, atascarse y atrasar toda la producción. Estos materiales son aquellos que no pueden ser molidos por cualquiera de los puntos de chancado del proceso y que generalmente son dientes y pernos de palas, de cargadores, brocas de perforación y bolas de molienda que se mezclan con el mineral durante la extracción.

Pero si, a pesar de todas las precauciones que puedan indicar, un Inchancables logra llegar hasta el proceso de triturado, la cámara del chancador, en cualquiera de sus etapas, sufrirá una serie de golpes que pueden ser muy dañinos para su funcionamiento, la presión hidráulica del equipo se elevará y si éste no cuenta con un sistema incorporado de liberación de presión para dejar salir el inchancables, el equipo sufrirá daños estructurales como fallas por fatiga, convulsión en sus rodamientos, daños en la transmisión y grietas en su revestimiento. Adicional a los costos por daños en los equipos de trituración, la presencia de Inchancables que no son retirados a tiempo de la línea de producción, causan demoras en todo el proceso, lo que puede ser un impacto financiero aún mayor para la industria. (Cromtek, 2021)

2.4.2. Métodos tradicionales para la detección de elementos inchancables

En la minería no solo se utilizan los drones con magnetómetros, también se utilizan diversos métodos para cumplir con el objetivo de la detección de elementos inchancables. Según el programa de innovación expande minería (2022) cada método tiene diferentes funciones que lo hacen único y proponen una solución para la detección de los elementos inchancables, alguno de estos métodos es:

Tabla 2.3 Métodos tradicionales en la actualidad

Método tradicional	Descripción	Ventajas	Limitaciones
Inspección visual manual	Operarios revisan visualmente el mineral en cintas transportadoras o en stockpiles antes del chancado.	Bajo costo inicial; no requiere tecnología especializada.	Altamente subjetiva, lenta, ineficaz para objetos enterrados o pequeños; alto riesgo laboral.
Detectores de metales en cintas transportadoras	Sensores electromagnéticos (por inducción) instalados sobre cintas que detectan metales ferrosos y no ferrosos en movimiento.	Detección en tiempo real; integración fácil en procesos existentes.	Solo detecta objetos en tránsito, no en stockpiles; no identifica profundidad ni ubicación exacta; alta tasa de falsos positivos por mineral magnético.
Magnetómetros manuales (portátiles)	Operario camina sobre el stockpile con un magnetómetro de mano (generalmente fluxgate o AMR) para mapear anomalías.	Más sensible que detectores de cinta; permite localizar objetos en reposo.	Cobertura lenta (horas por hectárea); exposición del personal a riesgos; interferencia por movimiento humano; baja resolución espacial.
Mantenimiento reactivo / paralización preventiva	No se realiza detección previa; se actúa tras daños en chancadores o se detiene preventivamente la operación.	No requiere inversión en sensores.	Altos costos por daños en equipos (USD 20,000–100,000+ por incidente); paralizaciones prolongadas; pérdida de productividad.

Fuente: Expande minería 2022

2.5. Softwares utilizados para el análisis y recolección de datos

El software que se usa es el UgCS (universal ground control software) que se utiliza para la planificación de vuelo y Oasis Montaj que se usa para transformar los datos en mapas y modelados. El skyhub es un ordenador a bordo que registra los datos que se toman de los sensores y otro que sirve para generar mapas es el DroneGIS. Otros softwares que se pueden utilizar son:

- **SENSYS MAGNETO:** es un software para el análisis e interpretación exhaustivos de los datos de medición de los magnetómetros MagDrone R1/R3/R4. Permite calcular la posición y el tamaño de objetos sospechosos.

- La herramienta de datos MagDrone es un software para el preprocesamiento de los datos de medición de todos los modelos MagDrone y sistemas de medición MagBase. Todos los compradores de los sistemas MagDrone R1/R3/R4 reciben una licencia gratuita de la herramienta de datos MagDrone. (Engineering, 2025)

2.6. Funcionamiento del dron en conjunto con el sensor magnetómetro

El funcionamiento del sistema inicia cuando el dron sobrevuela el área de estudio previamente delimitada. Durante el vuelo, el magnetómetro embarcado registra continuamente la intensidad del campo magnético terrestre. Posteriormente, estos datos se procesan para identificar anomalías, es decir, desviaciones respecto al valor esperado del campo, las cuales pueden indicar la presencia de objetos metálicos u otras características del subsuelo. (Acre, 2025)

Para lograr todo lo que se indica anteriormente, existe un protocolo de operación como el que se describe a continuación en 10 etapas:

1. Definir los objetivos del estudio: determine lo que su objetivo quiere lograr con el estudio, como detectar UXO, mapear sitios arqueológicos o localizar la infraestructura enterrada.
2. Seleccione el magnetómetro apropiado: elija un magnetómetro basado en los objetivos del estudio el tipo de datos necesarios y el entorno operativo.
3. Planifique la misión del estudio: use software de planificación de vuelo como UGCS para diseñar el área a estudiar y establecer rutas de vuelo. Defina la altitud, la velocidad y la cobertura requeridas para la encuesta.
4. Prepare el equipo: monte el magnetómetro en el UAV, asegurando que todos los componentes estén de forma segura. Configure cualquier equipo adicional necesario, como unidades GPS o altímetros.
5. Calibrar el magnetómetro: realice los procedimientos de calibración necesarios para garantizar que el magnetómetro esté proporcionando mediciones precisas. Esto puede incluir a cero el magnetómetro o la configuración de ajuste.

6. Realice el estudio: inicie el dron y ejecute la ruta de vuelo planificada previamente. El magnetómetro recopilará datos de campo magnético a medida que el dron vuela sobre el área estudiada.

7. Monitorear la recopilación de datos: durante el vuelo, monitore el proceso de recopilación de datos para asegurarse de que el magnetómetro funcione correctamente y capture los datos requeridos.

8. Análisis de datos posteriores al vuelo: recupere los datos recopilados del magnetómetro y procéselo utilizando el software de análisis de datos. Analice las mediciones del campo magnético para identificar anomalías e interpretar los resultados.

9. Revisión e informes de informes: revise los datos analizados para generar informes o mapas que detallen los hallazgos del estudio. Comparta los resultados con las partes interesadas y haga recomendaciones basadas en los datos.

10. Acciones de seguimiento: según los resultados del estudio, planifique y ejecute las acciones de seguimiento necesarias, como investigaciones adicionales y remediación del sitio. (Measur, 2025)

2.7. Viabilidad económica en la implementación de tecnología en minería.

La viabilidad económica También conocido como análisis costo-beneficio, evalúa si los beneficios proyectados del proyecto superan los costos estimados. Analiza exhaustivamente las implicaciones financieras, incluyendo la estimación de costos y los ingresos potenciales. En el contexto de las tecnologías en minería, se realizan evaluación mediante estudios la rentabilidad y factibilidad que puede otorgar al proyecto minero. (Bron, 2023), a continuación, se presenta una fórmula para determinar el beneficio económico, la formula denominada ROI (Retorno de la inversión).

Ecuación 2.1 Formula ROI

$$\frac{\text{Ingresos netos}}{\text{Costos de inversion}} \times 100$$

Fuente: Xepelin 2025

2.7.1. Costos relacionados del dron en conjunto con el magnetómetro

Para evaluar la viabilidad económica de las nuevas tecnologías en minerías requiere de un análisis bien estructurado de los costos involucrados, como lo serían los costos iniciales y finales. En el caso del dron y magnetómetro, los costos se pueden clasificar en costos de capital (inversión inicial) y costos operativos. Lo cual permite poder realizar una comparación frente los métodos tradicionales a beneficios de corto, mediano y largo plazo. (StudySmarter, 2024)

2.7.2. Costos de inversión inicial

La inversión inicial al adquirir el dron y magnetómetro se compone de 3 partes. La adquisición del dron, el sensor magnetómetro y accesorios complementarios. Según Clu-In (2012), los magnetómetros tienen un rango de costo estimado de USD 3.000 y 8.000. El costo dependerá del tipo de magnetómetro, su operación y sensibilidad.

En caso de los drones, su precio varía significativamente según su principio de operación y capacidad de integración con sistema de posicionamiento de alta precisión. Los drones más precisión y que tienen más capacidad de carga (entre 1-3 kg), tiene un rango de costo de adquisición de USD 4.000 y 7.000, en caso de los drones con menor tamaño y menor capacidad de carga rondan entre los USD 3.000 y 5.000

Adicionalmente, también en las operaciones se adquieren diversos accesorios complementarios que aportan más precisión en la obtención y toma de datos, uno de ellos puede ser brazo de suspensión no magnético, software de procesamiento. Estos accesorios pueden tener un rango de costo entre USD 500 y 1.000.

2.7.3. Costos operativos

Los costos operativos incluyen todos los gastos que son necesarios para mantener el funcionamiento de los dispositivos, algunos son:

- **Mantenimiento y calibración:** para estos dispositivos es crucial calibrar y mantener los equipos en buenas condiciones para asegurar la precisión de las mediciones, especialmente en ambientes extremos (Clu-in, 2012).
- **Software y procesamiento de datos:** se necesita software especializado para analizar los datos obtenidos y obtener información geológica útil, su costo ronda entre los USD 50 y 200.
- **Capacitación de personal:** para operar un dron es necesario ciertos requisitos como: Haber cumplido dieciocho años de edad, Presentar una declaración jurada ante notario de haber recibido instrucción teórica y práctica respecto al modelo de RPAS a volar, aprobar un examen escrito sobre la norma DAN 151, DAN 91 y Meteorología y Aerodinámica, La calificación mínima para aprobar será de un 75% y También El dron debe estar inscrito y certificado por la DGAC (DGAC, 2024).

2.8. Beneficios económicos indirectos

Los beneficios económicos indirectos por medio del uso de tecnologías innovadoras en minería son cada vez más rentables para las empresas, algunos de estos pueden ser:

2.8.1. Seguridad laboral

La implementación de los drones equipados con magnetómetro es cada vez más popular debido a su innovadora tecnología y su precisión para la detección de elementos inchancables, pueden ayudar a evitar riesgo, accidentes y perdidas al personal de la minera, ayudar a evitar pérdidas por daños a los equipos en las operaciones mineras y sirve para proteger la inversión realizada y no crear perdidas que afecten a la empresa (FLYABILITY, 2025).

2.8.2. Sostenibilidad y responsabilidad social

El uso de drones con magnetómetro puede mejorar significativamente la imagen empresarial en diversos factores como la innovación y compromiso ambiental al atraer inversionistas conscientes del medio ambiente, también el cumplimiento de las normas ambientales que cumplen estos dispositivos, aportando aún más su fama con el medio ambiente y la diferencia competitiva contra otros métodos tradicionales, destacándose en su eficiencia en la operación y cuidado del medio ambiente (Drones, 2025).

2.8.3. Reducción de tiempo de trabajo

La utilización del dron con sensor magnetómetro reduce en gran cantidad el tiempo al cubrir grandes áreas en pocos minutos, lo que permite avanzar a una velocidad adecuada y cubrir áreas más extensas en poco tiempo. También generando y recopilando datos en una fracción de tiempo que llevaría la exploración terrestre (Broadbend, 2024).

2.8.4. Reducción de personal

La implementación de drones con sensor magnetómetro puede reducir en gran medida la necesidad de personal en minería, ya que permite realizar diferentes tareas como exploración, mapeo y monitoreo de forma remota, lo que minimiza la exposición de trabajadores en áreas peligrosas. Además de la necesidad de tener personal que este capacitado para utilizar estos dispositivos (Ghosh, 2024)

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo de metodología

Para llevar a cabo esta investigación, se optó por una metodología descriptiva con un enfoque cuantitativa. La elección de esta metodología se justifica por la necesidad de fundamentar exclusivamente el análisis, síntesis y comparación de fuentes secundaria, tales como manuales técnicos, artículos científicos y estudios relacionados con el uso de drones con sensores magnetómetros en minería. El enfoque cuantitativo fue fundamental en esta investigación, ya que se basó en la recolección y análisis de datos numéricos y valores, lo que permite respaldar las conclusiones del trabajo.

3.2. Carácter de la metodología

El carácter de la presente investigación busca realizar una orientación en la descripción de las características técnicas, operativas y económicas de los dispositivos dron y sensor magnetómetro, además de comparar su eficiencia, efectividad y viabilidad frente a los métodos tradicionales. Este enfoque permite identificar ventajas, limitaciones y costos, contribuyendo a la toma de decisiones tecnológicas en el sector minero chileno.

3.3. Procedimiento para la creación de la escala de clasificación de magnetómetros en el contexto minero

Para establecer el cumplimiento al objetivo “explicar los tipos de magnetómetros que pueden detectar elementos inchancables para seleccionar los más adecuados según el contexto minero”, se desarrolló un procedimiento que consiste en cinco etapas, basadas exclusivamente en fuentes bibliográficas.

Para empezar, se identificaron y clasificaron los distintos tipos de magnetómetros descritos en el marco teórico (sección 2.2.1). a través de la diferenciación entre magnetómetros vectoriales y escalares, se elaboró una lista de seis magnetómetros que fueron considerados relevantes en el contexto minero.

- Magnetómetro de precesión de protones
- Magnetómetro de efecto Overhauser
- Magnetómetro de gas ionizado
- Magnetómetro de compuerta de flujo (fluxgate)
- Magnetómetro de bobina de búsqueda
- Magnetómetro SQUID

A continuación, se definieron cuatro variables fundamentales para la creación de la escala según los criterios técnicos expuestos en las secciones 2.2 a 2.4.

- Ventajas y desventajas.
- Compatibilidad con drones,
- Aptitud técnica para detectar objetos metálicos.
- Costo relativo.

Al conocer las variables, se empezó la creación de la escala de clasificación con puntajes de 0-3 puntos, cada puntaje tiene un criterio de evaluación según la información obtenida de fuentes bibliográficas (Clu-in, 2012), (Ripka, 2021), (Ungvarsky, 2023).

Tabla 3.1 Evaluación de magnetómetros por medio de variables

Variable	3 pts.	2 pts.	1 pt	0 pts.
Ventajas y desventajas técnicas	Alta precisión + bajo consumo + robustez	Buena precisión, pero limitaciones operativas (ej.: lento, sensible a vibración)	Precisión limitada o alto mantenimiento	Inaplicable en campo (ej.: requiere laboratorio)
Compatibilidad con drones	Común en sistemas comerciales (MagDrone, MagArrow)	Usado en plataformas especializadas	Posible, pero con dificultades técnicas (peso, interferencia)	No viable (estructura incompatible)
Aptitud técnica para detectar objetos metálicos	SNR > 3 para objetos <30 cm a 5 m	Detecta objetos >15–20 cm a <3 m	Solo detecta objetos grandes (>50 cm) o muy superficiales	No detecta objetos ferromagnéticos estáticos
Costo relativo	< USD 5.000	USD 5.000–8.000	USD 8.000–12.000	> USD 12.000

Fuente: Elaboración propia

También se recopiló información técnica detallada de cada magnetómetro por las secciones 2.2.2 a 2.2.7. Se obtuvieron características como la sensibilidad, requisitos operativos, temperatura y adaptabilidad en la detección de elementos metálicos.

Y se creó la escala de clasificación asignando un puntaje a cada uno de los magnetómetros en cada una de las variables, logrando así una escala de clasificación de los magnetómetros por medio de puntajes permitiendo identificar el magnetómetro más adecuado en el contexto minero.

Tabla 3.2 Escala de clasificación de los magnetómetros

Tipo de Magnetómetro	Ventajas y Desventajas (0–3 pts.)	Compatibilidad con Drones (0–3 pts.)	Aptitud Técnica para Detectar Objetos Metálicos Pequeños (<30 cm, 0–5 m) (0–3 pts.)	Costo Relativo (0–3 pts.)	Puntaje Total
Precesión de protones					
Overhauser					
Gas ionizado (óptico)					
Fluxgate (compuerta de flujo)					
Bobina de búsqueda					
SQUID / SERF					

Fuente: Elaboración propia

3.4. Analizar los drones compatibles con sensores magnetómetros a través de la creación de una tabla con especificaciones técnicas

Para establecer y cumplir el objetivo “Analizar los drones que son compatibles con el sensor magnetómetro para garantizar la precisión en la detección”, se desarrolló una tabla con diferentes especificaciones técnicas de los drones, todas basadas exclusivamente en fuentes bibliográficas.

En primera instancia, se determinaron e identificaron los criterios técnicos que determinar la compatibilidad entre un dron y un sensor magnetómetro, según lo indicado en la sección 2.3.2 del documento. Estos criterios corresponden a tres variables esenciales:

- El dron estuviera diseñado específicamente para la integración con el sensor magnetómetro.
- Cuenta con una capacidad de carga útil suficiente para poder soportar el peso del sensor magnetómetro y sus accesorios, sin arriesgar la estabilidad del vuelo.
- La incorporación de un sistema de navegación de alta precisión para garantizar la precisión exacta de las anomalías magnéticas.

Seguidamente, se realizó una recopilación de los distintos modelos de drones compatibles con el sensor mencionados en el marco teórico, lo cual serían los siguientes:

- SENSYS MagNIMBUS.
- SENSYS MagDrone R1.
- SENSYS MagDrone R3.
- SENSYS MagDrone R4.
- Geometrics MagArrow Mk2

Además, para cada uno de los modelos de drones, se identificaron y extrajeron las especificaciones técnicas más importantes a partir de la información del documento en las secciones 2.3-2.6. las especificaciones recopiladas son las siguientes:

- Tipo de UAV
- Capacidad máxima de carga útil
- Tipo de sistema de navegación
- Características del diseño de anti-interferencia magnética
- Compatibilidad declara con magnetómetros.

Y se procedió a analizar cada modelo del dron según los criterios establecidos a través de una tabla, que, para ello, se contrastó la información técnica recopilada según los diferentes requisitos indicados, para verificar si el dron cumplía con cada uno de los factores, permitiendo analizar y determinar la competencia técnica de cada dispositivo en el uso de la detección de elementos inchancables en stockpiles mineros.

Tabla 3.3 Análisis de variables sobre drones compatibles con el sensor

Modelo de UAV	Fabricante	Tipo de UAV	Capacidad de carga útil	Diseño anti-interferencia magnética	Sistema de navegación	Compatibilidad declarada con magnetómetros
MagNIMBUS						
MagDrone R1						
MagDrone R3						
MagDrone R4						
MagArrow Mk2						

Fuente: UAV navigation 2025

3.5. Evaluación de la efectividad del magnetómetro frente a métodos tradicionales a través de una tabla comparativa.

Para cumplir el objetivo “Evaluar la efectividad del sensor magnetómetro en la detección de elementos inchancables para verificar su desempeño frente a métodos tradicionales “, se desarrolló una tabla comparativa basada en análisis y sistematización teórica, todas basadas exclusivamente en fuentes bibliográficas.

Para comenzar, se identificaron diversos criterios relevantes para evaluar la efectividad de cualquier método de detección de elementos inchancables en el contexto minero, como lo serían el criterio operativo, técnico y económico. Cada uno de los criterios fueron extraídos de la teoría en la investigación, específicamente de las secciones 2.2-2.8.

A partir de los diferentes criterios tomados del marco teórico, se realizó una selección de los más importantes y relevantes en el contexto minero, que son los siguientes:

- Precisión en la detección.
- Cobertura del área.
- Tiempo de ejecución.
- Seguridad operacional.
- Costo operativo.
- Capacidad de detección de objetos metálicos.
- Impacto en la producción.

Seguidamente, se realizó una revisión global de diversas fuentes bibliográficas, incluyendo manuales técnicos, informes institucionales (como Sernageomin), estudios de casos similares y documentación de empresas fabricantes. Esta revisión exhaustiva permitió caracterizar, de forma independiente, el dron con sensor magnetómetro y los métodos tradicionales.

También se creó una rubrica de evaluación donde permite conocer la calificación obtenida en cada criterio de evaluación, que podrá obtener la calificación de: bueno, regular y malo.

Tabla 3.4 Rubrica de evaluación de efectividad del dron con sensor magnetómetro frente métodos tradicionales.

Criterio de evaluación	Bueno	Regular	Malo
Precisión en la detección	Describe claramente que el sistema detecta anomalías y menciona objetos específicos (brocas, pernos).	Menciona que el sistema es más preciso, pero sin especificar el umbral técnico (SNR) ni ejemplos concretos de objetos.	No distingue diferencias reales; sugiere que ambos métodos tienen igual precisión o no aborda el tema.
Cobertura del área	Explica que el sistema cubre grandes áreas en poco tiempo y contrasta con la limitación espacial de los métodos manuales.	Indica que el sistema cubre más área, pero sin fundamentar con datos	No menciona diferencias en cobertura o sugiere que ambos son equivalentes.
Tiempo de ejecución	Señala que el sistema reduce significativamente el tiempo gracias a automatización	Menciona que el sistema es más rápido, pero sin vincularlo al contexto minero.	No aborda el factor tiempo o lo describe de forma ambigua.
Seguridad operacional	Destaca que el sistema elimina la exposición humana a zonas de riesgo	Menciona que el sistema es más seguro, pero sin justificar con riesgos específicos.	Ignora el aspecto de seguridad o lo minimiza.
Costo operativo	Compara inversión inicial (USD 7.500–16.000) con ahorro a largo plazo por prevención de daños.	Menciona costos, pero sin diferenciar entre inversión inicial y ahorro futuro.	Presenta una comparación errónea (ej.: sistema más caro sin beneficios) o no aborda el tema.
Capacidad de detección de objetos metálicos	Especifica que detecta brocas, pernos, dientes de pala y bolas de molienda.	Menciona “objetos metálicos”, pero sin ejemplos concretos.	No distingue qué objetos se detectan o sugiere que ambos métodos detectan lo mismo.
Impacto en la producción	Explica que el sistema es preventivo (evita daños).	Indica que el sistema evita paralizaciones.	No aborda el impacto en la producción o lo describe de forma incorrecta.

Fuente: Elaboración propia.

Terminada la recopilación de información, se creó la estructura de la tabla comparativa en la que, cada criterio describió las características del dron con el sensor y los métodos tradicionales, permitiendo comparar y demostrar las ventajas de cada uno de los métodos que existen en la detección de elementos inchancables.

Tabla 3.5 Evaluación de efectividad del dron con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales.

Criterio de Evaluación	Dron con sensor magnetómetro	Métodos tradicionales
Precisión en la detección		
Cobertura del área		
Tiempo de ejecución		
Seguridad operacional		
Costo operativo		
Capacidad de detección de objetos metálicos		
Impacto en la producción		

Fuente: Elaboración propia.

3.5.1. Análisis de software utilizados en el sensor magnetómetro a través de una tabla comparativa.

Para saber aún más en la evaluación de la efectividad del sensor magnetómetro, es necesario identificar, comparar y evaluar los softwares utilizados junto con los sensores magnetómetros para la detección de elementos inchancables. Se aplicó la creación de una tabla comparativa basado exclusivamente en análisis teórico e informes técnicos.

Para iniciar, se identificaron todos los softwares mencionados en el marco teórico, específicamente en la sección 2.6, además de investigar empresas como SENSYS y Geometric. Los softwares identificados fueron:

- UGCS.
- Oasis Montaj.
- SENSYS MAGNETO.
- Herramienta de datos MagDrone
- DroneGIS.
- Skyhub.

Después, a cada software se revisaron manuales técnicos, documentación oficial y hojas de producto. Con el objetivo de determinar su función principal dentro del trabajo en la detección de elementos. La función de trabajo se dividió en tres variables:

- Planificación de vuelo
- recolección y registro de datos
- procesamiento e interpretación.

Luego se analizaron las distintas características operativas de cada software, obteniendo las ventajas, desventajas y limitaciones técnicas o funcionales. Finalmente, se resumió la información en una tabla comparativa, donde permitiera observar una evaluación clara y concisa de cada software.

Tabla 3.6 Evaluación de diversas características de softwares utilizados en sensor magnetómetro.

Software	Función principal	Ventajas	Desventajas	Limitaciones
UGCS				
Oasis Montaj				
SENSYS MAGNETO				
Herramienta de Datos MagDrone				
DroneGIS				
SkyHub				

Fuente: Geometric 2025

3.6. Operación del dron equipado con el sensor magnetómetro en faenas mineras.

El cumplimiento al objetivo “Describir la operación y funcionamiento del dron equipado con el sensor magnetómetro para facilitar su uso en faenas mineras”, se desarrolló por medio de una tabla centrada principalmente en la sistematización del protocolo operativo, demostrando e indicando los pasos antes, durante y después del funcionamiento del sistema.

Para comenzar, se identificó como fuente de información el protocolo de operación, presentado en la sección 2.7, dado que el protocolo fue realizado en un contexto general en minería, se comenzó a adaptarlo al contexto minero, especialmente en los stockpiles y en la detección de elementos inchancables.

Después, se realizó una revisión teórica con las demás secciones del marco teórico, lo que permitió enriquecer y contextualizar los pasos del protocolo, especialmente se consultaron las siguientes secciones:

- La sección 2.3
- La sección 2.6
- La sección 2.3.2
- La sección 2.7

También, se reestructuro el protocolo original en 11 etapas progresivas, ajustando cada etapa reflejando las condiciones operativas de una faena minera real, algunos de ellos pueden ser:

- Definición del objetivo centrado en elementos inchancables.
- Selección del equipo adecuado en minería.
- Planificación sobre los stockpiles.
- Calibración en diferentes entornos.
- Creación de informes técnicos para operaciones.

Para cada etapa, se le asignaron 3 variables necesarias las cuales son: una acción específica y replicable, los recursos técnicos necesarios y el fundamento técnico o normativo necesario para dar cumplimiento al protocolo.

Para terminar, toda la información fue organizada en la creación de una tabla, con el objetivo de servir como guía operativa clara, para que, cualquier profesional del área minera pueda implementar el sistema dron y magnetómetro en alguna faena minera.

Tabla 3.7 Paso a paso de la operación del dron equipado con el sensor magnetómetro

Paso	Acción Específica	Momento, Lugar y Modo de Ejecución	Conexión y Funcionamiento del Sistema
1	Definir el objetivo de detección		
2	Seleccionar el equipo adecuado		
3	Planificar la misión de vuelo		
4	Preparar y montar el sistema en terreno		
5	Calibrar el magnetómetro en sitio		
6	Ejecutar el vuelo de detección		
7	Monitorear la calidad de los datos en tiempo real		
8	Descargar y respaldar los datos post-vuelo		
9	Procesar e interpretar los datos		
10	Generar informe técnico georreferenciado		
11	Validar en terreno y cerrar ciclo operativo		

Fuente: Measur 2025

3.6.1. Detección de tipos de elementos inchancables con el dron equipado con el sensor magnetómetro en faenas mineras.

A través de una estimación de los posibles elementos inchancables que este sistema puede detectar. Se realizó la creación de una tabla evaluando la susceptibilidad magnética y el procedimiento basado en tres etapas:

- Caracterización de los elementos inchancables más comunes en minería.
- Análisis de propiedades magnéticas requeridas para su detección.
- Revisión de teoría necesaria para determinar la detección.

Seguidamente se identificó y reviso la teoría especializada en catalogar los distintos elementos inchancables típicos en operaciones mineras, con énfasis en aquellos con presencia en los stockpiles. A partir de informes del servicio nacional de geología y minería se establecen los objetos típicos encontrados en los stockpiles:

- Brocas de perforación.
- Dientes y pernos de pala hidráulica.
- Dientes de cargadores frontales.
- Bolas de molienda.
- Diversos fragmentos metálicos.

Para cada uno de ellos, se registró la composición del material, dimensiones típicas y profundidad esperada. También, se analizaron las especificaciones técnicas mínimas que un magnetómetro debe tener para detectar anomalías magnéticas por diversos objetos. Según lo dicho por Ripka (2021) y Savkin (2021), se consideró que la detección depende de la señal-ruido (SNR). Se adoptó como inicio de detección la relación señal-ruido mayor a 3, criterio que fue ampliamente aceptado en prospección magnética para considerar una anomalía como significativa.

Además, se tuvieron en cuenta las condiciones operativas de un dron: altura de vuelo típica, velocidad de muestreo del magnetómetro y la resolución espacial del área. Cada uno de estos parámetros influye en la capacidad de determinación del sistema para distinguir objetos pequeños o enterrados.

A partir de este análisis, se realizó la clasificación de elementos inchancables en dos categorías:

- Detectables.
- No detectables.

Este análisis permitió la creación de una tabla identificando que elemento es susceptible a ser detectado por el sensor magnetómetro.

Tabla 3.8 Evaluación de la susceptibilidad magnética de diversos elementos
inchancables

Elemento inchancable	Composición típica	Masa aproximada	Profundidad típica en stockpile	¿Genera anomalía magnética detectable?	¿Detectable por dron con magnetómetro?
Brocas de perforación					
Dientes de pala hidráulica					
Pernos de fijación de dientes					
Bolas de molienda (mediano/gran de)					
Fragmentos metálicos pequeños (<200 g)					
Cables o alambres metálicos					
Herramientas manuales perdidas (llaves, martillos)					
Restos de cintas transportadora s (rodillos, soportes)					

Fuente: Elaboración propia.

3.7. Viabilidad económica del dron equipado con el sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales

Para ejecutar el objetivo “Determinar la viabilidad económica que genera el dron con el sensor magnetómetro en comparación con los métodos tradicionales para demostrar sus beneficios a largo plazo (después de 2 años)”, se aplicó la creación de una tabla comparativa centrado principalmente en la sistematización de costos y beneficios a ambas alternativas, todas basadas exclusivamente en fuentes bibliográficas.

Previamente, se identificaron y definieron las variables económicas que permitió una comparación significativa y estructurada. La selección de las variables fue a partir de la sección 2.8 y sus subsecciones (2.8.1, 2.8.2 y 2.8.3). las variables seleccionadas fueron:

- Costos iniciales.
- Costos operativos.
- Costos de mantenimiento.
- Costos de capacitación.
- Costos en accesorios
- Beneficios a corto, mediano y largo plazo.

Seguidamente, se realizó una revisión de las diferentes fuentes bibliográficas del documento, para así extraer los datos económicos asociados al dron equipado con sensor magnetómetro y a los métodos tradicionales. Para los diferentes datos, se consultaron las secciones 2.8.2 y 2.8.3 donde se detallan los precios aproximados de drones, magnetómetros, accesorios, software y requisitos de capacitación. Para los datos de los métodos tradicionales, se extrajo información de la sección 2.4.2, donde se describen sus variables económicas principales.

Además, se categorizaron los diferentes elementos económicos bajo cada variable definida. En el caso de los beneficios a corto (1 día a 6 meses), mediano (6 meses a 2 años) y largo plazo (más de 2 años), se analizaron la información descrita en las secciones 2.9.1, 2.9.2 y 2.4.1.

A continuación, toda la información extraída se organizó en una tabla comparativa, dónde se evaluó el dron con el sensor magnetómetro frente a los métodos tradicionales a través de seis variables económicas. La tabla fue creada con el propósito de sintetizar, de la mejor manera, la viabilidad económica de los dispositivos investigados.

Tabla 3.9 Evaluación de la viabilidad económica del dron con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales.

Variable económica	Dron con sensor magnetómetro	Métodos tradicionales
Costos iniciales		
Costos operativos		
Costos de mantenimiento		
Costos de capacitación		
Beneficios a corto, mediano y largo plazo		
Costos en accesorios		

Fuente: Clu-In 2012

Y para determinar la rentabilidad del dron equipado con el sensor magnetómetro, se aplicó la formula anteriormente mencionada en el marco teórico de retorno de la inversión, adaptada al contexto de ahorros operativos generados por la prevención de incidentes asociados a los elementos inchancables, como lo seria:

- Reparación de equipo
- Reducción de mano de obra

Primero, se identificaron los costos de inversión inicial, considerando los rangos de costos establecidos en la sección 2.7.2. estos valores estimados incluyen. el valor del dron de ala rotativa, el sensor magnetómetro, los accesorios y el software requerido.

Posteriormente, se estimó el beneficio económico anual asociado al sistema investigado. Dado que el proyecto no genera ingresos directos, dicho beneficio se interpretó como el ahorro monetario por la prevención de incidente anual por la presencia de diversos elementos inchancables y las posibles fallas o reparaciones de piezas que puedan producir, seguidamente, se consideró el costo promedio por incidente reportado por diversas fuentes bibliográficas, específicamente Cromtek (2021), Sernageomin (2024), también se identificó los sueldos del personal requerido para el sistema investigado, también así como de los métodos tradicionales, para realizar una comparación y determinar el ahorro por reducción de personal. Además, se ajustó el valor según la efectividad del sistema, basada en estudio como Savkin (2021) respaldan una capacidad de detección superior al 80% para objetos metálicos, especialmente en stockpiles.

Y, para terminar, se aplicó la fórmula de retorno de inversión, expresada como el beneficio económico anual (ahorro) y el costo total de inversión, multiplicado por 100. El resultado se expresa en porcentaje y permitió evaluar la rentabilidad del sistema. Dando que, si el resultado es mayor a 10%, se considera un sistema rentable.

Ecuación 3.1 Formula ROI (reestructurada)

$$\frac{\textit{Beneficio economico anual (ahorro)}}{\textit{Costos de inversion inicial}} \times 100$$

Fuente: Xepelin 2025

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS

4.1. Resultados de la escala de clasificación de magnetómetros

Para determinar el magnetómetro más adecuado para la detección de elementos inchancables en stockpiles, se elaboró una escala de clasificación comparativa entre seis distintos tipos de magnetómetro, esta escala permite identificar cual magnetómetro ofrece un mejor rendimiento, desempeño técnico y viabilidad económica. En base a la metodología descrita en el capítulo anterior, los resultados son los siguientes:

Tabla 4.1 Resultados de la escala de clasificación de los magnetómetros.

Tipo de Magnetómetro	Ventajas y Desventajas (0–3 pts.)	Compatibilidad con Drones (0–3 pts.)	Aptitud Técnica para Detectar Objetos Metálicos Pequeños (<30 cm, 0–5 m) (0–3 pts.)	Costo Relativo (0–3 pts.)	Puntaje Total
Precesión de protones	✓ Alta precisión absoluta ✗ Lento (1–3 seg./lectura), alto consumo, sensible a vibraciones → 2 pts.	Limitada: tamaño y peso elevados → 1 pt	Buena sensibilidad (~0.1 nT), baja frecuencia → 2 pts.	Medio-alto (USD 5k–8k) → 2 pts.	7
Overhauser	✓ Alta precisión, bajo consumo, rápido (~1 Hz) ✗ Requiere líquido especial → 3 pts.	Moderada: usado en drones profesionales → 2 pts.	Excelente sensibilidad (<0.01 nT) → 3 pts.	Alto (USD 6k–10k+) → 1 pt	9
Gas ionizado (óptico)	✓ Muy alta precisión y velocidad ✗ Muy sensible a vibración → 2 pts.	Baja: requiere estabilización → 1 pt	Excelente sensibilidad, pero ruido en drones → 2 pts.	Muy alto (>USD 10k) → 0 pts.	5
Fluxgate (compuerta de flujo)	✓ Buen equilibrio: sensible, robusto, bajo costo ✗ Requiere calibración → 3 pts.	Alta: ligero, bajo consumo, usado en drones → 3 pts.	Suficiente para objetos >10 cm → 2 pts.	Bajo (USD 2k–5k) → 3 pts.	11
Bobina de búsqueda	✓ Simple, económico ✗ Solo detecta campos variables → 0 pts.	Inaplicable en este contexto → 0 pts.	No apto para objetos estáticos 0 pts.	Muy bajo → 3 pts.	3
SQUID / SERF	✓ Ultra-sensible ✗ Requiere criogenia o laboratorio → 0 pts.	Incompatible con drones → 0 pts.	Impracticable en minería → 0 pts.	Extremadamente alto → 0 pts.	0

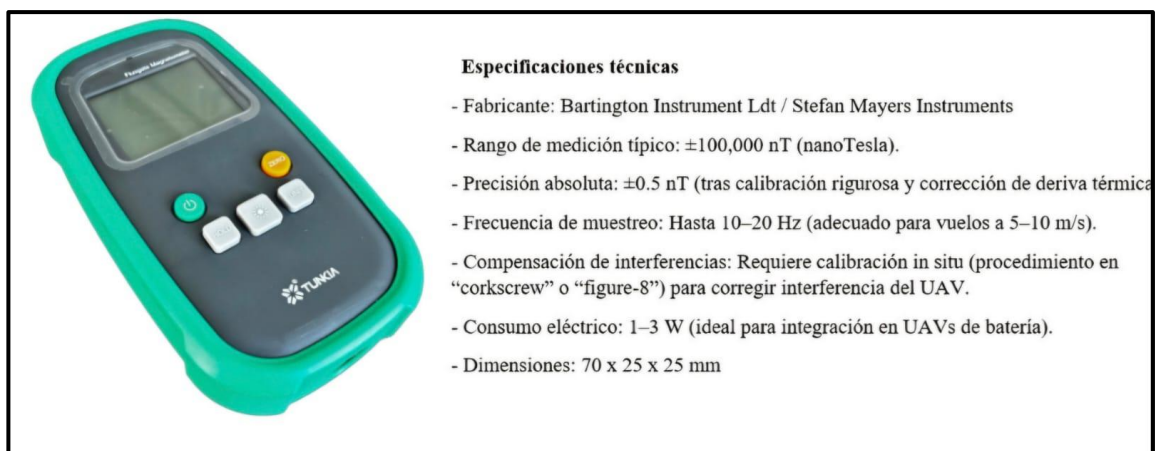
Fuente: Elaboración propia.

La evaluación comparativa entre los seis magnetómetros considerados arrojó un resultado evidente, el magnetómetro fluxgate obtuvo un puntaje de 11 pts de 12 posibles. Este resultado se debió a una combinación específica de las 4 variables evaluadas, lo que permitió alinearlos perfectamente con los requisitos en el contexto minero.

El alto puntaje del magnetómetro fluxgate se destacó principalmente por su alta compatibilidad con drones, una variable esencial en esta investigación y cumpliendo con un requisito fundamental en este análisis, además de su bajo costo relativo, al colocarse en un rango accesible (USD 2k-5k), lo que permite a distintas empresas mineras tanto pequeñas, medianas y grandes poder adquirir el sistema investigado. Además, demostrando una aptitud técnica suficiente y efectivo para detectar elementos inchancables más comunes en stockpiles mineros (como brocas de perforación y dientes de pala) al permitir detectar objetos a más de 10 cm bajo superficie.

El alto puntaje obtenido también se debió a la ausencia de desventajas críticas en su perfil técnico, aunque requiere calibración de manera periódica, esto no compromete su operatividad en terreno, a comparación con otros magnetómetros que exigen condiciones muy especiales. Esto permitió identificar por qué cumplió de manera equilibrada y eficaz con las cuatro variables evaluadas, también permitió consolidarse cómo la opción más evidente para el contexto minero definido en esta investigación.

Figura 4.1 Magnetómetro fluxgate y sus especificaciones técnicas



Fuente: KMS Technologies.

4.2. Resultados del análisis de los drones compatibles con el sensor magnetómetro.

La identificación de los drones más compatibles con el sensor magnetómetros y adecuados para la detección de elementos inchancables se pudo realizar por un análisis comparativo de los diferentes modelos de drones, para ello, se creó una tabla técnica con especificaciones técnicas de los distintos modelos. En base a la metodología descrita en el capítulo anterior, los resultados son los siguientes:

Tabla 4.2 Resultados del analisis de las variables de los drones compatibles con el sensor magnetometro

Modelo de UAV	Fabricante	Tipo de UAV	Capacidad de carga útil	Diseño anti-interferencia magnética	Sistema de navegación	Compatibilidad declarada con magnetómetros
MagNIMBUS	SENSYS	Ala rotativa	≥ 2 kg	Sí: estructura no magnética y montaje en brazo extendido	GNSS con RTK/PPK	Sí: diseñado para sensores escalares y vectoriales
MagDrone R1	SENSYS	Ala rotativa	≥ 1.5 kg	Sí: brazo no magnético de suspensión	GNSS con RTK	Sí: integración nativa con Overhauser y fluxgate
MagDrone R3	SENSYS	Ala rotativa	≥ 2.5 kg	Sí: sistema de compensación magnética activa	GNSS con PPK/RTK	Sí: compatible con sensores vectoriales y escalares
MagDrone R4	SENSYS	Ala rotativa	≥ 3 kg	Sí: diseño optimizado para baja interferencia	GNSS con PPK	Sí: para levantamientos de alta resolución
MagArrow Mk2	Geometrics	Ala Rotativa	≥ 2 kg	Sí: fuselaje no metálico y sensor en booms frontales	GNSS con PPK	Sí: diseñado para magnetómetros escalares (Overhauser)

Fuente: UAV Navigation 2025

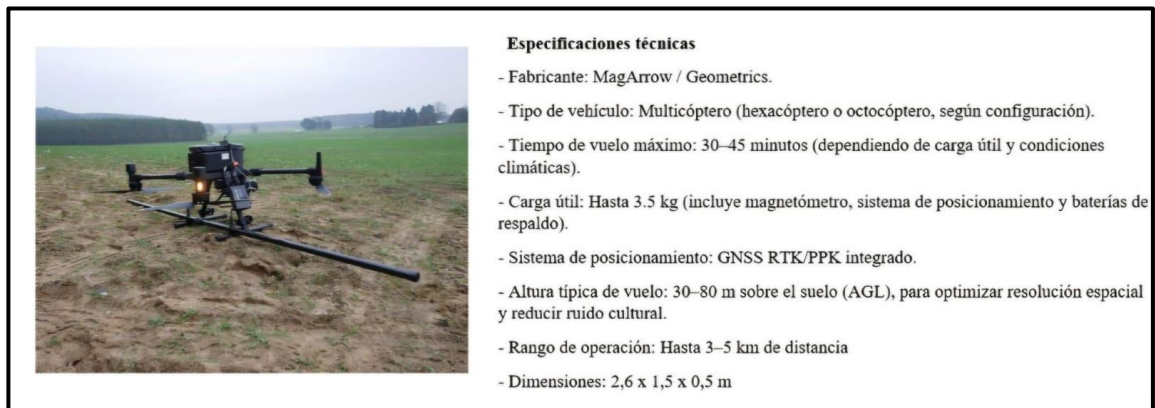
El análisis de los drones compatibles con sensores magnetómetros pudo identificar que el MagDrone R4, fabricado por la empresa Sensys, fue el modelo más adecuado para la detección de elementos inchancables en stockpiles mineros. Esta conclusión se basó en que fue el único dron que cumplió satisfactoriamente los tres requisitos técnicos definidos en la metodología.

El MagDrone R4 tuvo una gran diferencia a comparación con lo demás drones especialmente porque tuvo una capacidad de carga útil de al menos 3kg, lo que permite transportar sin restricciones el sensor y accesorios complementarios, además de presentar un diseño de anti-interferencia magnética, lo que garantiza la precisión de las mediciones.

Por último, incorporo un sistema de navegación GNSS (Global Navigation Satellite System) con PPK (Post-Processing Kinematic), asegurando una precisión en la posición de dispositivo, fundamental para tener una georreferencia exacta de las anomalías magnéticas detectadas.

Por estas razones, el MagDrone R4 fue identificado como el dron más adecuado para implementar al sistema investigado, ya que aseguro compatibilidad técnica y operativa con el sensor seleccionado, eficiencia en terreno y seguridad en los resultados obtenidos.

Figura 4.2 MagDrone R4 y sus especificaciones técnicas



Fuente: SENSYS

4.3. Resultados de la evaluación de la efectividad del magnetómetro frente a métodos tradicionales.

La evaluación de la efectividad del sistema investigado en la detección de elementos inchancables se realizó a través de una comparación frente a los métodos tradicionales utilizados en minería, para ello, se elaboró una tabla comparativa que evaluó las alternativas por medio de siete criterios, lo que permitió determinar cuál sistema ofrece un desempeño superior en el contexto de stockpiles mineros, en base a la metodología descrita en el capítulo anterior, los resultados son los siguientes:

Tabla 4.3 Resultados de la evaluación de efectividad del dron con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales.

Criterio de Evaluación	Dron con sensor magnetómetro	Métodos tradicionales
Precisión en la detección	Alta: detecta anomalías magnéticas con relación señal-ruido >3, especialmente en objetos metálicos cercanos a la superficie (bueno)	Variable: depende del operario y del equipo; puede presentar falsos negativos o baja resolución. (regular)
Cobertura del área	Amplia: cubre grandes extensiones en poco tiempo (bueno)	Limitada: requiere inspección manual o vehículos lentos en terreno. (regular)
Tiempo de ejecución	Reducido: vuelos automatizados permiten mapeo rápido. (bueno)	Elevado: procesos manuales o semimanuales demoran más. (malo)
Seguridad operacional	Alta: operación remota sin exposición humana a zonas de riesgo. (bueno)	Baja: personal expuesto a zonas con riesgo de colapso, maquinaria pesada o explosivos. (regular)
Costo operativo	Moderado inicialmente (USD 7.000–15.000 en equipos + software), pero bajo a largo plazo por automatización. (bueno)	Alto a largo plazo: mano de obra especializada, mantenimiento de equipos y paralizaciones por daños. (regular)
Capacidad de detección de objetos metálicos	Alta: sensible a anomalías magnéticas generadas por brocas, pernos, dientes de pala, etc. (bueno)	Limitada: depende de técnicas como inspección visual, detectores manuales o tamizado mecánico. (regular)
Impacto en la producción	Preventivo: permite identificar inchancables antes de que dañen equipos. (bueno)	Reactivo: generalmente se detectan tras daños o paralizaciones. (malo)

Fuente: Elaboración propia.

La evaluación de la efectividad del dron con sensor magnetómetro frente a los métodos tradicionales pudo identificar y concluir que el sistema investigado fue significativamente más efectivo que los métodos tradicionales para la detección de elementos inchancables en stockpiles mineros.

La superioridad se basó en siete criterios evaluados: precisión en la detección, cobertura del área, tiempo de operación, seguridad operacional, costo operativo, capacidad de detectar objetos metálicos e impacto en la producción.

El sistema dron-magnetómetro se destacó por su alta precisión, gracias a la superación de la señal-ruido, lo que permitió identificar anomalías magnéticas generadas por diversos objetos como brocas o dientes de pala. Además de proporcionar una cobertura amplia y rápida, también redujo significativamente el tiempo de ejecución y elimino la exposición de cualquier trabajador a zonas de peligro, aportando y mejorando a la seguridad, aunque su inversión inicial fue moderada (USD 7.000-15.000), lo compenso con su costo operativo y su enfoque operativo evito la realización de paralizaciones y posibles daños costosos en la producción.

En cambio, los métodos tradicionales terminaron resultando menos precisos, más lentos, riesgosos y costosos, con una capacidad muy limitada para detectar objetos y un impacto de reacción que solo intervenían después de los daños ocurridos.

Al cumplir con los criterios de evaluación de manera satisfactoria, el dron con sensor magnetómetro se consolidó como el sistema más eficiente, segura y económicamente rentable para la detección de elementos inchancables según el contexto minero.

4.3.1. Resultados de los softwares utilizados con el sensor magnetómetro

Teniendo el propósito de identificar el software más adecuado para su uso en conjunto con el dron y sensor magnetómetro en la detección de elementos inchancables, se realizó un análisis comparativo entre las 6 herramientas mencionadas en el marco teórico, a partir de diversas variables, se comprobaron las capacidades, limitaciones y nivel de especialización de cada software, con el fin de determinar el software más adecuado e integral para el sistema dron-magnetómetro, en base a la metodología descrita en el capítulo anterior, los resultados son los siguientes:

Tabla 4.4 Resultados de la evaluación de diversas características de software utilizados en sensor magnetómetro.

Software	Función principal	Ventajas	Desventajas	Limitaciones
UGCS	Planificación de vuelo del dron	Interfaz intuitiva, compatible con múltiples UAV, permite definir rutas, altitud y velocidad con precisión.	No procesa datos magnéticos; solo sirve para la etapa de adquisición.	Requiere integración con otros softwares para análisis post-vuelo.
Oasis Montaj	Procesamiento y modelado de datos geofísicos	Potente en análisis espacial, genera mapas 2D/3D, ampliamente usado en minería y geofísica.	Curva de aprendizaje pronunciada; licencia comercial costosa.	No está diseñado exclusivamente para drones; requiere preprocesamiento previo de datos.
SENSYS MAGNETO	Análisis e interpretación de datos de magnetómetros MagDrone	Específico para sensores SENSYS, permite estimar posición y tamaño de objetos, interfaz optimizada.	Solo compatible con equipos SENSYS (MagDrone R1/R3/R4).	Acceso restringido a usuarios que adquieran hardware de la marca.
Herramienta de Datos MagDrone	Preprocesamiento de datos de magnetómetros MagDrone	Gratuito para compradores de sistemas MagDrone, corrige ruido, compensa interferencias y sincroniza con GPS.	Funcionalidad limitada a limpieza básica; no incluye modelado avanzado.	No permite análisis geológico profundo; debe usarse junto con otro software (ej. Oasis Montaj).
DroneGIS	Generación de mapas a partir de datos de drones	Integración directa con plataformas UAV, visualización geoespacial rápida.	Poca documentación pública; funcionalidad magnética no detallada en el documento.	Posible limitación en precisión para detección de anomalías débiles.
SkyHub	Registro y almacenamiento de datos a bordo	Actúa como ordenador de vuelo, registra datos en tiempo real, mejora la sincronización sensor-GPS.	No realiza análisis; solo es un sistema de adquisición.	Depende de software externo para interpretación.

Fuente: Geometric 2025

La identificación de los softwares utilizados con el sensor magnetómetro pudo indicar que el SENSYS MAGNETO fue el más adecuado para la interpretación y procesamiento de datos en el contexto de detección de elementos inchancables en stockpiles mineros. La elección del software se debió a que era el único diseñado específicamente para el magnetómetro elegido en la sección 4.1 (MagDrone R4), lo que garantizó una integración técnica viable y una recopilación e interpretación precisa de las anomalías magnéticas.

Lo que diferenció el software elegido de los demás fue su capacidad para estimar con alta precisión la posición y tamaño de objetos metálicos mediante un análisis completo, algo que otros softwares no ofrecían. Mientras que las demás herramientas se limitaban a la planificación de vuelo, visualización de datos y preprocesamiento previo, el SENSYS MAGNETO integró de forma perfecta las etapas más críticas de recolección, procesamiento e interpretación de datos optimizadas para el hardware elegido.

En síntesis, SENSYS MAGNETO sobresalió como el software más adecuado porque ofreció distintas características esenciales para la detección de objetos metálicos, como lo son el procesamiento e integración de datos del magnetómetro según el contexto minero, una característica fundamental para saber la ubicación más precisa del elemento inchancable, principalmente en los stockpiles mineros.

4.4. Resultados sobre la operación del dron equipado con sensor magnetómetros en faenas mineras

Con la finalidad de lograr la implementación del sistema dron-magnetómetro en cualquier faena minera, se creó un protocolo operativo estructurado en 11 etapas. Este protocolo se elaboró a partir de adaptación y sistematización de diversos procedimientos teóricos descritos en diversos informes técnicos, ajustados específicamente al contexto de detección de elementos inchancables en stockpiles.

Cada etapa fue desarrollada considerando distintos componentes esenciales, como recursos técnicos necesarios, acción clara y fundamento técnico. Todo esto con el objetivo de proporcionar una guía práctica e informativa para cualquier faena o profesional del sector minero. En base a la metodología descrita en el capítulo anterior, los resultados son los siguientes:

Tabla 4.5 Resultados del paso a paso de la operación del dron equipado con el sensor magnetómetro.

Paso	Acción Específica	Momento, Lugar y Modo de Ejecución	Conexión y Funcionamiento del Sistema
1	Definir el objetivo de detección	Cuando: Antes de la movilización al sitio. Dónde: En oficina o sala de planificación minera. Cómo: Identificar zonas críticas en stockpiles donde se sospecha presencia de elementos inchancables (brocas, dientes de pala, bolas de molienda).	No aplica (etapa previa al montaje).
2	Seleccionar el equipo adecuado	Cuando: Simultáneamente con la planificación. Dónde: Bodega técnica o centro de operaciones. Cómo: Elegir el dron MagDrone R4 y el magnetómetro Fluxgate, verificando compatibilidad y estado técnico.	El sensor magnetómetro Fluxgate viene integrado en una góndola no magnética del dron. La conexión es física y eléctrica
3	Planificar la misión de vuelo	Cuando: 24–48 horas antes del vuelo. Dónde: En estación de trabajo con software UgCS. Cómo: Delimitar el área del stockpile, definir altura de vuelo (10–20 m), velocidad (3–5 m/s) y solapamiento de líneas (≥30%).	El plan de vuelo se carga al controlador de vuelo del dron. El sistema GNSS-PPK se sincroniza para georreferenciar cada medición del magnetómetro.
4	Preparar y montar el sistema en terreno	Cuando: En el día de operación, antes del despegue. Dónde: Zona segura adyacente al stockpile. Cómo: Instalar el magnetómetro en su suspensión anti-interferencia, verificar baterías, GPS y enlace de telemetría.	El magnetómetro se conecta al SkyHub (computadora a bordo) que registra datos sincronizados con posición GNSS. El dron transmite estado en tiempo real a la estación de control terrestre (GCS).
5	Calibrar el magnetómetro en sitio	Cuando: Inmediatamente antes del vuelo. Dónde: En el mismo punto de despegue, lejos de interferencias metálicas. Cómo: Ejecutar rutina de “zeroing” o compensación de campo según el manual del fabricante.	El sistema realiza una lectura de fondo del campo magnético terrestre para eliminar desviaciones. Esta calibración se guarda en el firmware del sensor y se aplica a todas las mediciones posteriores.
6	Ejecutar el vuelo de detección	Cuando: Durante la ventana operativa definida (preferentemente sin viento fuerte ni lluvia). Dónde: Sobre el stockpile objetivo. Cómo: El dron sigue la ruta preprogramada; el operador monitorea en tiempo real.	Durante el vuelo, el magnetómetro mide continuamente la intensidad del campo magnético. Cada medición se georreferencia con precisión centimétrica gracias al GNSS con corrección PPK. Los datos se almacenan en el SkyHub y se respaldan en tarjeta SD.
7	Monitorear la calidad de los datos en tiempo real	Cuando: Durante el vuelo. Dónde: Desde la estación de control en terreno. Cómo: Verificar que no haya picos espurios, pérdidas de señal o desvíos de trayectoria.	El software de tierra (UgCS o SENSYS MAGNETO) muestra gráficos de campo magnético vs. posición. Cualquier anomalía técnica activa alertas auditivas/visuales.
8	Descargar y respaldar los datos post-vuelo	Cuando: Inmediatamente después del aterrizaje. Dónde: En el sitio o centro de procesamiento. Cómo: Extraer tarjeta SD o sincronizar vía USB/Wi-Fi con computadora.	Se transfieren los archivos crudos (.csv o mag) con datos de campo magnético, posición, tiempo y altitud. Se verifica la integridad y se genera copia de seguridad.
9	Procesar e interpretar los datos	Cuando: Dentro de las 24 horas posteriores al vuelo. Dónde: En oficina técnica con software especializado. Cómo: Usar SENSYS MAGNETO para filtrar ruido, corregir deriva y generar mapa de anomalías.	El software aplica correcciones (diurnas, de plataforma, topográficas) y genera modelos 2D/3D. Identifica anomalías con relación señal-ruido >3 y estima ubicación, profundidad y tamaño del objeto.
10	Generar informe técnico georreferenciado	Cuando: Tras la validación de los resultados. Dónde: Oficina de planificación minera. Cómo: Documento con mapas, coordenadas UTM de anomalías, tipo probable de objeto y recomendaciones de intervención.	El informe incluye coordenadas precisas para guiar al equipo de remoción. Se vincula con sistemas GIS de la mina.
11	Validar en terreno y cerrar ciclo operativo	Cuando: Dentro de los 2–3 días posteriores al informe. Dónde: En el stockpile, en las coordenadas reportadas. Cómo: Excavación controlada para confirmar presencia del elemento inchancable y retirarlo.	Si se confirma la detección, se actualiza la base de datos de la mina. Si hay falsos positivos, se ajustan parámetros del sistema para futuras misiones.

Fuente: Measur 2025

La creación del protocolo operativo para la implementación del sistema dron-magnetómetro en faenas mineras determinó que es aplicable y funcional en contextos reales de minería. El protocolo, estructurado en once etapas ordenadas, abarca todo el ciclo operativo del sistema, desde la identificación del objetivo a solucionar (detectar elementos inchancables en stockpiles) hasta la identificación y retiro del elemento inchancable detectado.

Lo más relevante del protocolo es la integración de forma ordenada la adquisición, utilización y procedimiento técnico adaptado al entorno minero. Cada etapa incluye una acción específica, como los recursos necesarios (dron, magnetómetro, software, accesorios, etc.) y también un fundamento normativo técnico lo que garantiza la comprensión en la utilización y rigor operativo del sistema.

Además, el protocolo incorpora practicas esenciales, como la calibración del magnetómetro, el monitoreo en tiempo real y la utilización de sistemas de navegación GNSS con PPK para una precisión centimétrica, lo que asegura la calidad y seguridad de los datos. La etapa final siendo la identificación del elemento inchancable detectado y su posterior retiro de la superficie.

En conjunto, el protocolo no solo es práctico, sino también seguro, técnicamente sólido y orientado a la prevención. Lo que lo convierte en una guía operativa para cualquier faena minera que quiera implementar esta tecnología.

4.4.1. Resultados sobre la detección de elementos inchancable en faenas mineras.

Para conocer qué elementos inchancables pueden ser detectados por el sistema dron equipado con sensor magnetómetro, se realizó un análisis técnico basado exclusivamente en propiedades físicas y magnéticas de los objetos más comunes encontrados en stockpiles mineros. Se desarrollo la tabla con diferentes criterios para identificar los elementos detectados y no detectados, todo esto en función de su capacidad para generar alguna anomalía magnética bajo las condiciones operativas del sistema, en base a la metodología descrita en el capítulo anterior, los resultados son los siguientes:

Tabla 4.6 Resultados de la evaluación de susceptibilidad magnética de diversos elementos inchancables.

Elemento inchancable	Composición típica	Masa aproximada	Profundidad típica en stockpile	¿Genera anomalía magnética detectable?	¿Detectable por dron con magnetómetro?
Brocas de perforación	Acero al carbono (ferromagnético)	2–10 kg	Superficial a 0.5 m	Sí	✓ Sí
Dientes de pala hidráulica	Acero aleado (ferromagnético)	1–5 kg	Superficial a 0.4 m	Sí	✓ Sí
Pernos de fijación de dientes	Acero al carbono	0.2–1 kg	Superficial a 0.3 m	Sí	✓ Sí
Bolas de molienda (mediano/grande)	Hierro fundido / acero	0.5–7 kg	Hasta 0.6 m	Sí	✓ Sí
Fragmentos metálicos pequeños (<200 g)	Acero o hierro	<0.2 kg	Variable (0–0.3 m)	Débil o nula	✗ No
Cables o alambres metálicos	Acero o cobre recubierto	Masa lineal baja	Superficial	Muy débil (si no ferromagnético)	✗ No
Herramientas manuales perdidas (llaves, martillos)	Acero al carbono	0.3–2 kg	Superficial	Sí	✓ Sí
Restos de cintas transportadoras (rodillos, soportes)	Acero estructural	3–15 kg	Superficial a 0.7 m	Sí	✓ Sí

Fuente: Elaboración propia.

La identificación en la detección de elementos inchancables con el sistema investigado determino que el sistema es sumamente efectivo para detectar objetos metálicos ferromagnéticos de tamaño y ubicados cerca de la superficie o a poca profundidad. Los elementos detectados como brocas de perforación, dientes de pala hidráulica, pernos, herramientas perdidas, bolas de molienda y restos de cintas transportadoras comparten dos características claves para poder ser detectadas: tener composición ferromagnética (acero) y una masa lo suficientemente necesaria (mayor a 0.2 kg) para ser considerada una anomalía magnética significativa y poder el sensor detectar.

En cambio, los elementos que no fueron detectados como fragmentos metálicos pequeños y cables o alambres metálicos, carecieron de las propiedades dichas anteriormente, su baja masa o su no composición ferromagnética, termino generando una débil o nula señal de anomalía magnética, además la profundidad variable de dichos objetos contribuyo a su no detección.

La diferenciación entre los elementos no representa un fallo en la detección del sistema, sino una limitación de los objetos a la física de la prospección magnética, lo que determina que solo los objetos con masa y magnetismo adecuado producen una señal lo suficientemente significativa para ser detectadas como anomalías magnéticas. Por lo cual, el sistema dron-magnetómetro se colocó como herramienta altamente eficaz para prevenir distintos incidentes que pudo ocurrir, enfocándose en elementos que puedan representar un gran riesgo, mientras que los demás objetos requieren de otros métodos complementarios de detección.

4.5. Resultados de la viabilidad económica del dron equipado con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales.

Para lograr determinar la viabilidad económica del sistema dron-magnetómetro en comparación con los métodos tradicionales, se realizó un análisis detallado a través de una tabla con diferentes variables económicas esenciales en estos sistemas, lo que permitió poder determinar diversos costos, beneficios y rentabilidad del sistema dron-magnetómetro, a través de la utilización de la fórmula de retorno de la inversión (ROI) para evaluar la viabilidad y eficiencia financiera del sistema en el contexto minero, en base a la metodología descrita en el capítulo anterior, los resultados son los siguientes:

Tabla 4.7 Resultados de la evaluación de viabilidad económica del dron con sensor magnetómetro frente a métodos tradicionales.

Variable económica	Dron con sensor magnetómetro	Métodos tradicionales
Costos iniciales	Moderado a alto: (dron: USD 4.000–7.000; magnetómetro: USD 3.000–8.000; accesorios no magnéticos: USD 500–1.000)	Bajos a moderados: equipos manuales (detectores de metales portátiles, palas, tamices) con costos iniciales menores a USD 2.000, pero limitada cobertura y precisión.
Costos operativos	Bajos: consumo eléctrico del dron, software de procesamiento (USD 50–200), y vuelos autónomos que reducen horas-hombre.	Altos: requiere mano de obra especializada en terreno, movilización de personal, tiempo prolongado de inspección y paralizaciones operativas frecuentes.
Costos de mantenimiento	Moderados: calibración periódica del magnetómetro y mantenimiento preventivo del dron.	Variables: desgaste de equipos manuales, reposición frecuente, y costos asociados a daños en chancadores no detectados a tiempo.
Costos de capacitación	Moderados: operadores deben cumplir requisitos DGAC (exámenes, certificación, instrucción teórico-práctica).	Bajos: capacitación mínima en inspección visual o uso de detectores básicos; sin embargo, depende fuertemente de la experiencia del operario.
Beneficios a corto, mediano y largo plazo	Corto plazo: detección preventiva, reducción de paralizaciones. Mediano plazo: menor desgaste de equipos, mayor disponibilidad operativa. Largo plazo: ahorro acumulado en reparaciones, mejora en seguridad laboral y sostenibilidad.	Corto plazo: bajo desembolso inicial. Mediano plazo: costos crecientes por fallas no detectadas. Largo plazo: altos costos por daños estructurales en chancadores, tiempos muertos y riesgos laborales
Costos en accesorios	Bajos: brazos de suspensión no magnéticos, GPS de alta precisión, baterías adicionales, estaciones de carga.	Mínimos: guantes, palas, tamices metálicos, detectores portátiles simples. Sin embargo, estos no permiten detección profunda ni georreferenciación.

Fuente: CLU-IN 2012

El análisis comparativo para determinar la viabilidad económica del sistema dron equipado con sensor magnetómetro a través de la comparación de costos y beneficios identifico que el sistema dron-magnetómetro es la opción económicamente más viable frente a los métodos tradicionales, por medio de los diferentes beneficios a mediano y largo plazo. Aunque sus costos iniciales de la adquisición del dron, magnetómetro, software y accesorios complementarios fueron moderados a altos, estos se complementaron por medio de los ahorros generados en la operación continua.

En cambio, los métodos tradicionales tenían costos iniciales bajos, además presentaban costos operativos y de mantenimiento altos por la necesidad constante de personal adecuado, el tiempo de inspección y las frecuentes paralizaciones que ocurrían.

Una de las principales ventajas del sistema dron-magnetómetro radica en los beneficios a mediano y largo plazo, como lo serían permitir la realización de una detección preventiva que evitaba daños a los equipos, una significativa mejora en la seguridad de los trabajadores, reducción de tiempos de paralización en la operación. En síntesis, se traduce en una gran cantidad de dinero ahorrado en reparaciones y una mejora en la sostenibilidad en la disponibilidad operativa.

Además, para conocer aún más los beneficios y la rentabilidad que genera el sistema dron-magnetómetro, se aplicó la fórmula de retorno de la inversión (ROI), los resultados son los siguientes:

Ecuación 4.1 Resultados de datos y fórmula de ROI

BENEFICIOS: - Ahorro anual estimado: USD 49.700 - Ahorro en Reparaciones de equipos: 40.000 USD - Ahorro en reducción de personal: 9.700 USD - Efectividad del sistema: 85% - Beneficio económico anual (ahorro): 42.245 USD	COSTOS: - Valor del dron: 6.000 USD - Valor del magnetómetro: 8.500 USD - Valor de Accesorio complementarios: 800 USD - Valor de Software: 150 USD - Valor de capacitación y licencia: 1.400 USD - Valor estimado del operador (salario anual): 12.000 USD - Valor del ayudante de campo (salario anual): 8.000 USD - Valor total: 36.850 USD
Fórmula de ROI $\frac{42.245}{36.850} \times 100: 114,6 \%$	

Fuente: Elaboración propia

La aplicación de la fórmula de retorno de la inversión (ROI) determinó un resultado de 114,6%, lo que confirma que la rentabilidad del sistema dron equipado con sensor magnetómetro es altamente positiva. Un ROI superior al 10% reflejaba se consideraba rentable, lo que significaba que un valor de 114,6% reflejaba una rentabilidad extremadamente eficiente.

El alto retorno permitió concluir que la inversión inicial se recuperaría aproximadamente en diez meses, dado que el beneficio económico anual (ahorro) estimado era de USD 42.245 y la inversión inicial de USD 36.850. Esto no solo mostraba que el sistema era viable, sino que ofrecía un retorno de la inversión inicial rápido y sustancial, lo que lo convertía en una solución altamente llamativa para diferentes empresas mineras, independientemente de su tamaño.

En síntesis, el análisis de la viabilidad económica confirmó que el sistema dron equipado con sensor magnetómetro no solo era superior en características técnicas, sino también financieramente rentable, con una recuperación de la inversión en diez meses y un retorno anual que superaba con creces la inversión inicial y otros costos asociados.

CAPÍTULO V: CONCLUSIÓN

La presente investigación confirmó que el uso de drones equipados con sensor magnetómetro representa una solución técnica y operativa viable, ya que cumple con criterios de seguridad y económicos. Además de su función principal en la detección de elementos inchancables en stockpiles mineros, así cumpliendo con el objetivo general de investigar su eficiencia y viabilidad económica.

En correlación con los objetivos específicos, se pudo identificar que el magnetómetro de compuerta de flujo (Fluxgate) como el más adecuado según el contexto minero, específicamente en los stockpiles, debido a diversas razones como su alta compatibilidad con drones, la sensibilidad extraordinaria para detectar objetos metálicos a poca profundidad y su costo accesible. Además, el MagDrone R4 fue seleccionado como el más adecuado por su capacidad de carga, el sistema de navegación GNSS con PPK y su diseño de anti-interferencia magnética, que lo convirtió en el dispositivo más compatible y adecuado con el magnetómetro elegido. La realización de la evaluación comparativa en la efectividad del sistema dron-magnetómetro demostró ser ampliamente superior a los métodos tradicionales, teniendo una cobertura de 2-5 km², tiempo de ejecución de 1.5-2.5 horas, una mejora en la seguridad laboral y operacional, costo operativo de aproximadamente 70 USD/día y por, sobre todo, la precisión en la detección de elementos inchancables de 1.0-2.5 nt. La creación del protocolo de operación mediante el uso integrado del dron MagDrone R4 y el magnetómetro fluxgate aporta conocimiento, además de un avance significativo en la digitalización e innovación tecnológica al utilizar el sistema investigado, pudiendo describir los distintos pasos y herramientas necesarias para utilizar correctamente el sistema y transformar las prácticas tradicionales en procesos eficaces, inteligente y altamente seguros. Desde una vista económica, el análisis sobre la viabilidad económica del sistema dron-magnetómetro a través de la utilización de la fórmula de retorno de la inversión (ROI) arrojó un valor de 114.6 %, lo que permitió demostrar que la inversión inicial de 36.850 USD, se recuperó en un tiempo estimado de diez meses, lo que demuestra ser un sistema altamente rentable. Para la proyección, se propuso combinar el sistema con otras tecnologías complementarias que aporten aún más en su capacidad de detección a objetos metálicos de menor tamaño.

BIBLIOGRAFÍA

- Acre, G. (2025). *Grupo Acre*. <https://grupoacre.com.pt/es/catalogo-productos/sistema-de-magnetometro-para-drones/#:~:text=Al%20medir%20el%20campo%20magn%C3%A9tico,de%20datos%20de%20magnet%C3%B3metros%2C%20etc>
- Apddrones. (2025). *Apddrones*. <https://idc.apddrones.com/educacion/que-es-un-drone-y-para-que-sirve/>
- Broadbend, E. (30 de Diciembre de 2024). *MDPI*. <https://www.mdpi.com/2504-446X/9/1/24>
- Bron, D. (7 de Junio de 2023). *Linkedin*. <https://www.linkedin.com/pulse/art-feasibility-studies-technology-adoption-daniel-bron>
- Clu-in. (29 de Marzo de 2012). *Contaminant Site Clean-Up Information*. [https://clu-in.org/characterization/technologies/default2.focus/sec/Geophysical Methods/cat/Magnetometry/#section-heading-sh3-10n](https://clu-in.org/characterization/technologies/default2.focus/sec/Geophysical%20Methods/cat/Magnetometry/#section-heading-sh3-10n)
- Cornejo, L. (19 de julio de 2023). *Revista minería crisol*. <https://revistacrisol.cl/mineria-moderna-del-siglo-xxi/>
- costa, p., & paez, m. (diciembre de 2021). *scribd*. <https://es.scribd.com/document/692989797/IMPLEMENTACION-DE-DRONES-AE-REOS-EN-MINERIA-SUBTERRANEA-CHILENA-2-1-2>
- Cromtek. (5 de Mayo de 2021). *Cromtek*. <https://www.cromtek.cl/2021/05/05/inchancables-el-mayor-problema-de-la-produccion-minera/>
- DGAC. (22 de Febrero de 2024). *Dirección General De Aeronáutica Civil*. <https://www.dgac.gob.cl/como-operar-un-drone-en-chile/>
- dron, G. (16 de mayo de 2025). *Tienda go dron*. <https://tienda.godron.mx/descubre-como-funciona-un-drone-y-sorprendete-con-la-tecnologia-de->

[dji/#:~:text=Funcionamiento%20de%20un%20drone,obtener%20resultados%20profesionales%20sin%20esfuerzo.](#)

Drones, R. (7 de Febrero de 2025). *RPAS Drones*. <https://rpas-drones.com/drones-industria-minera-prospeccion-monitoreo-seguridad/>

Engineering, S. (2025). *SPH Engineering*. <https://www.sphengineering.com/integrated-systems/downloads>

FLYABILITY. (29 de septiembre de 2025). *FLYABILITY*. <https://www.flyability.com/es/dron-minero>

Geometrics. (2025). *Geometrics*. <https://www.geometrics.com/product/magarrow/>

Ghosh, B. (28 de junio de 2024). *Flytbase*. <https://www.flytbase.com/es/blog/drones-for-mining-industry>

Measur. (2025). *Measur*. <https://measurusa.com/blogs/news/drone-based-magnetometer-surveys-techniques-tools-and-tips?shpxid=43dd9683-1bbd-40d0-99d4-f27060e9a35e>

mineria, E. (23 de Diciembre de 2022). *Expande minería*. <https://expandemineria.cl/desafios/deteccion-y-retiro-de-elementos-inchancables-en-chancado/>

navigation, U. (3 de agosto de 2018). *UAV navigation*. <https://www.uavnavigation.com/es/empresa/blog/uav-navigation-en-profundidad-magnetometros-por-que-son-criticos-para-la-navegacion#:~:text=La%20utilizaci%C3%B3n%20de%20un%20sistema,utilizando%20las%20mediciones%20del%20magnet%C3%B3metro>

NME, R. (23 de Junio de 2025). *Revista NME*. <https://www.nuevamineria.com/revista/asegurando-el-futuro-de-la-exploracion-en-chile-con-tecnologia-de-de-ultima-generacion/>

procus, E. (2013). *El procus*. <https://www.elprocus.com/magnetometers-types-applications/>

Ripka, P. (2021). *Magnetic sensors and magnetometers*. london: Artech House.

savkin, A. (3 de mayo de 2021). *MDPI*. <https://www.mdpi.com/1424-8220/21/9/3175>

sernageomin. (31 de mayo de 2024). *sernageomin*. <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2024/05/Accidentabilidad-Minera-2024-31052024.pdf>

StudySmarter. (5 de Septiembre de 2024). *StudySmarter*. <https://www.studysmarter.es/resumenes/ingenieria/ingenieria-tecnologia-minera/evaluacion-economica-minera/>

Ungvarsky, J. (2023). *EBSCO*. <https://www.ebsco.com/research-starters/history/magnetometer>