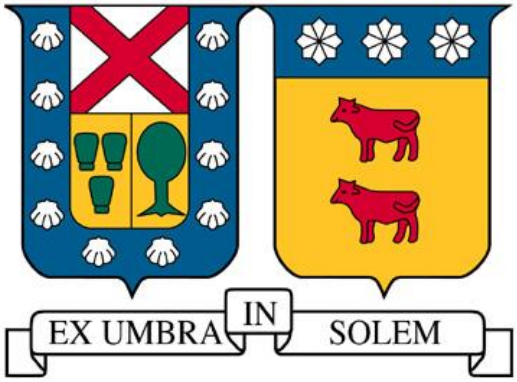
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE AERONÁUTICA
SANTIAGO – CHILE



EVALUACIÓN TÉCNICA, NORMATIVA Y CURRICULAR PARA LA INCORPORACIÓN DE MANTENIMIENTO DE RPAS/DRONES EN LA FORMACIÓN ACADÉMICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Javier Cataldo Alvares

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUÍA : SR. Leonardo Lobos
PROFESOR CORREFERENTE : SR. Martinus Potters

Octubre 2026

CONSTANCIA DE VALIDACIÓN Y CONFIDENCIALIDAD DE MONOGRAFÍA A REPOSITORIO ACADÉMICO

1.- IDENTIFICACIÓN DEL TRABAJO ACADÉMICO

Tipo de monografía (marcar una opción): ☒ Memoria o trabajo de título; ☐ Tesis de Postgrado;

Título del trabajo: EVALUACIÓN TÉCNICA, NORMATIVA Y CURRICULAR PARA LA INCORPORACIÓN DE MANTENIMIENTO DE RPAS/DRONES EN LA FORMACIÓN ACADÉMICA DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA

Nombre del candidato(a): Javier Ignacio Cataldo Alvares

Carrera / Grado: Ingeniería en aviación comercial

Campus: Santiago Vitacura **;** **Departamento**: Academia de Ciencias Aeronáuticas (ACA)

2.- VALIDACIÓN DEL PROFESOR GUÍA/DIRECTOR DE TESIS

Yo, Leonardo Lobos Flores, en mi calidad de profesor(a) guía/director(a) del trabajo académico mencionado anteriormente **DEJO CONSTANCIA** que:

- He revisado esta versión del documento y corresponde a la versión final aprobada del trabajo.
- El trabajo cumple con los requisitos académicos y de formato establecidos por la institución

3.- EVALUACIÓN DE CONFIDENCIALIDAD POR PROPIEDAD INDUSTRIAL

☒ El trabajo **NO contiene información que amerite confidencialidad** y puede ser publicado de inmediato en repositorio con acceso abierto.

☐ El trabajo **CONTIENE** información con potenciales implicancias de propiedad industrial o intelectual y requiere un periodo de confidencialidad (embargo) por:

☐ 6 meses; ☐ 12 meses; ☐ 2 años; ☐ 3 años; ☐ 5 años; ☐ 10 años

Fundamentación de la necesidad de confidencialidad (obligatorio si se solicita embargo):

4.- FIRMAS

Profesor(a) guía o director(a) de memoria o tesis:

Fecha: 23/10/2026 ; **Firma:** _____

Estudiante o Candidato(a):

Fecha: 23/10/2026 ; **Firma:** _____

Este formulario debe ser insertado como página 2 de la memoria o tesis, completado y firmado por estudiante y profesor(a) antes de la entrega en portal PRISMA de Biblioteca USM.

Dedicatoria.

Al ir finalizando esta importante etapa de mi vida, quiero dedicar este logro a mi hermana, a mi madre y a mi compañera, por su cariño, apoyo incondicional y por impulsarme siempre a creer en mí, incluso en los momentos más difíciles.

Agradezco también a todas las personas que me acompañaron durante este camino, especialmente a mis amigos y profesores, quienes de distintas maneras fueron parte de esta etapa y contribuyeron a mi crecimiento personal y profesional.

De manera especial, agradezco a mi profesor guía, por su disposición, paciencia y por estar siempre atento a mis dudas durante el desarrollo de esta memoria. Asimismo, a mi profesor correferente, por su apoyo y orientación a lo largo de toda mi etapa universitaria.

Resumen.

Esta memoria evalúa la pertinencia técnica, normativa y curricular de incorporar formación especializada en mantenimiento de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS/drones) en la Universidad Técnica Federico Santa María, así como las condiciones preliminares de su puesta en marcha. Se desarrolló una investigación exploratoria, descriptiva y propositiva basada en revisión normativa nacional e internacional, caracterización técnica de RPAS, levantamiento exploratorio con actores del sector y análisis comparativo de la formación aeronáutica existente. Los antecedentes permitieron identificar y priorizar brechas técnicas, normativas, documentales y formativas, especialmente en diagnóstico, procedimientos de fabricante y trazabilidad. Tras comparar modalidades académicas, se diseñó un curso de educación continua de ocho módulos, con una carga de referencia de 40 horas: 19 conceptuales y 21 prácticas. Su evaluación mediante un modelo técnico-económico parametrizado en Microsoft Excel, complementado con Solver, comparó escenarios de 24, 40, 60 y 80 horas bajo restricciones curriculares y operacionales. La alternativa de 40 horas presentó el mejor desempeño económico relativo entre las curricularmente factibles. Sin embargo, con 16 participantes, un precio de evaluación de $550.000 y tres versiones anuales, su Valor Actual Neto a tres años fue negativo. El análisis identificó condiciones más favorables con una matrícula cercana a 20 participantes. Se concluye que la propuesta presenta pertinencia académica y técnica, pero su apertura requiere validación institucional, curricular y comercial, sin interpretar los escenarios como demanda estimada.

Palabras clave: RPAS; mantenimiento de drones; educación continua; trazabilidad; evaluación técnico-económica.

Abstract

This thesis assesses the technical, regulatory, and curricular relevance of introducing specialized training in remotely piloted aircraft systems (RPAS/drones) maintenance at Universidad Técnica Federico Santa María, as well as the preliminary conditions for its implementation. An exploratory, descriptive, and proposal-oriented study was conducted through a review of Chilean and international regulations, technical characterization of RPAS, exploratory information gathering from sector stakeholders, and a comparative analysis of existing aeronautical education. The findings enabled the identification and prioritization of technical, regulatory, documentation, and training gaps, particularly in fault diagnosis, manufacturer procedures, and maintenance traceability. After comparing academic alternatives, an eight-module continuing education course was designed with a reference duration of 40 hours: 19 theoretical and 21 practical. A parameterized techno-economic model developed in Microsoft Excel, with Solver as a complementary selection tool, compared 24-, 40-, 60-, and 80-hour scenarios subject to curricular and operational constraints. The 40-hour alternative achieved the best relative economic performance among the academically feasible scenarios. However, with 16 participants, an evaluation price of CLP 550,000 per participant, and three annual course offerings, its three-year Net Present Value was negative. More favorable financial conditions were identified at enrollment levels close to 20 participants. The study concludes that the proposed course is technically and academically relevant, but its implementation requires institutional, curricular, and commercial validation; the evaluated scenarios must not be interpreted as demand forecasts.

Keywords: RPAS; drone maintenance; continuing education; traceability; techno-economic assessment.

Tabla de contenido

1 Antecedentes Generales, ... 17

1.1 Justificación..... 17

1.1.1 Pregunta clave de la investigación.....23

1.2 Objetivos 24

1.3 Metodología y teoría 25

1.4 Alcance 32

2 Estado del Arte..... 38

2.1 Antecedentes del sector. 38

2.2 Marco normativo chileno relevante para el estudio de RPAS/drones. 43

2.3 Marco normativo de referencia asociado al mantenimiento aeronáutico. 46

2.4 Mantenimiento RPAS/drones. 49

2.4.1 Seguridad operacional, enlaces de comunicación e interferencias en RPAS/drones 54

2.5 Formación técnica y competencias requeridas para mantenimiento de RPAS/drones. 57

2.6 Referentes internacionales para el mantenimiento de UAS/RPAS 60

2.7 Síntesis metodológica derivada del Estado del Arte. 64

3 Desarrollo..... 68

3.1 Diagnóstico normativo aplicado..... 69

3.2 Identificación de actores y estrategia de levantamiento de información 73

3.3 Resultados del levantamiento de información 78

3.3.1 Entrevista exploratoria con representante de la DGAC.....79

3.3.2 Resultados obtenidos mediante solicitudes de acceso a información pública 81

3.3.3 Antecedentes de servicios técnicos y entidades de capacitación 86

3.3.4 Síntesis comparativa de resultados.....90

3.4 Análisis de brechas técnicas, normativas y formativas 94

3.4.1 Brecha normativa 97

3.4.2 Brecha técnica 99

3.4.3 Brecha documental y de trazabilidad 102

3.4.4 Brecha formativa 106

3.4.5 Tratamiento de procedimientos de fabricante 109

3.4.6 Síntesis, análisis causal y priorización de brechas 112

3.5 Propuesta de curso de especialización o educación continua en mantenimiento de RPAS/drones 117

3.5.1 Evaluación de alternativas y fundamentación de la propuesta. 118

3.5.2 Nombre propuesto del curso 123

3.5.3 Objetivo general del curso 124

3.5.4 Perfil de ingreso del curso 125

3.5.5 Perfil de egreso del curso 127

3.5.6 Estructura general del curso 130

3.5.7 Estructura modular y contenidos mínimos 134

3.5.8 Elementos diferenciadores de la propuesta formativa 141

3.5.9 Resultados de aprendizaje y evaluación del curso 145

3.5.10 Requerimientos básicos de implementación 149

3.6 Evaluación preliminar de puesta en marcha mediante modelo técnico-económico 156

3.6.1 Enfoque del modelo técnico-económico 162

3.6.2 Supuestos, variables y datos de entrada del modelo 168

3.6.3 Formulación del modelo técnico-económico 176

3.6.4 Resultados del modelo técnico-económico 201

3.6.5 Selección de alternativa y condiciones de implementación. 232

3.6.6 Limitaciones, condiciones de validación y líneas de desarrollo futuro. 238

4 Conclusiones y recomendaciones. 256

4.1 Conclusiones. 256

4.1.1 Cumplimiento del objetivo específico 1. 256

4.1.2 Cumplimiento del objetivo específico 2. 258

4.1.3 Cumplimiento del objetivo específico 3. 260

4.1.4 Cumplimiento del objetivo específico 4. 261

4.1.5 Conclusión respecto del objetivo general. 263

4.2 Recomendaciones. 265

4.2.1 Validación de una primera ejecución. 266

4.2.2 Desarrollo hacia reconocimiento DGAC. 267

4.2.3 Desarrollo de una línea académica RPAS. 268

4.2.4 Actualización permanente. 268

5 Referencias 270

6 Anexos 277

Índice de Figuras.

Figuras 1-1: Relación entre regulación operacional, uso profesional de RPAS, necesidad de mantenimiento y evaluación de una alternativa formativa. 20

Figuras 1-2: Secuencia metodológica de la investigación. 28

Figuras 2-1: Utilización de RPAS para inspección de sectores de difícil acceso en División El Teniente. 39

Figuras 2-2: Componentes principales de un RPAS industrial DJI Matrice 350 RTK. 50

Figuras 3-1:Análisis causal de las brechas asociadas al mantenimiento de RPAS/drones mediante diagrama de Ishikawa. 114

Figuras 3-2: Secuencia de evaluación del modelo técnico-económico de puesta en marcha. 166

Figuras 3-3: Sensibilidad del VAN del escenario S2 según matrícula 216

Índice de Tablas.

Tabla 2-1 :Antecedentes normativos, operacionales, técnicos y formativos del sector RPAS en Chile. 42
Tabla 2-2:Síntesis del marco normativo chileno aplicable al estudio. 45
Tabla 2-3: Normativa chilena utilizada como referencia comparativa del mantenimiento aeronáutico tradicional. 48
Tabla 2-4: Principales áreas técnicas asociadas al mantenimiento de RPAS/drones. 53
Tabla 2-5: Aspectos técnicos vinculados a seguridad operacional en RPAS/drones. 56
Tabla 2-6: Competencias preliminares para el mantenimiento técnico de RPAS/drones. ... 59
Tabla 2-7: Referentes internacionales para el análisis del mantenimiento de UAS/RPAS. 63
Tabla 3-1:Aplicación del marco normativo chileno al diagnóstico de la investigación. 72
Tabla 3-2: Categorías de actores considerados en el levantamiento de información. 77
Tabla 3-3:Antecedentes de oferta privada vinculada al mantenimiento de RPAS/drones. .. 89
Tabla 3-4: Matriz de hallazgos del levantamiento de información. 91
Tabla 3-5: Dimensiones consideradas para el análisis de brechas técnicas, normativas, documentales y formativas. 96
Tabla 3-6: Niveles de intervención técnica identificados para el mantenimiento de RPAS/drones. 101
Tabla 3-7: Registros técnicos relevantes para la trazabilidad del mantenimiento de RPAS/drones. 105
Tabla 3-8:Relación entre capacidades formativas de TUMA USM y requerimientos específicos identificados para el mantenimiento de RPAS/drones. 108
Tabla 3-9:Tratamiento formativo de procedimientos de fabricante en mantenimiento RPAS/drones. 111
Tabla 3-10:Síntesis de brechas y factores transversales identificados. 113
Tabla 3-11:Matriz multicriterio de priorización de factores asociados a las brechas identificadas. 116
Tabla 3-12: Evaluación comparativa de alternativas formativas y justificación de la modalidad seleccionada. 121
Tabla 3-13: Perfil de ingreso propuesto para el curso. 126
Tabla 3-14: Perfil de egreso propuesto para el curso. 129

Tabla 3-15:Estructura general propuesta para el curso. 133
Tabla 3-16: Estructura modular propuesta y carga horaria de referencia. 137
Tabla 3-17: Contenidos mínimos propuestos por módulo. 140
Tabla 3-18: Elementos diferenciadores de la propuesta formativa respecto de la oferta privada identificada. 144
Tabla 3-19: Resultados de aprendizaje propuestos para el curso. 146
Tabla 3-20: Propuesta de evaluación del curso. 148
Tabla 3-21: Requerimientos básicos de implementación del curso. 152
Tabla 3-22: Parámetros base para la evaluación técnico-económica de puesta en marcha 155
Tabla 3-23: Estructura general del modelo técnico-económico de puesta en marcha. 159
Tabla 3-24: Dimensiones y criterios de evaluación incorporados al modelo técnico económico. 167
Tabla 3-25: Principales supuestos y datos de entrada del modelo técnico-económico 170
Tabla 3-26: Estructura de costos considerada en el modelo técnico-económico 178
Tabla 3-27: Factibilidad curricular de los escenarios evaluados 203
Tabla 3-28: Inversión técnica inicial considerada para la puesta en marcha 206
Tabla 3-29: Costos operacionales por versión según escenario, con matrícula base de 16 participantes 209
Tabla 3-30: Resultados económico-financieros del caso base 211
Tabla 3-31: Sensibilidad económica del escenario S2 según matrícula 215
Tabla 3-32: Principales resultados del análisis de puntos de equilibrio 225
Tabla 3-33: Sensibilidad del VAN de S2 frente a tasa de descuento y horizonte 227
Tabla 3-34: Sensibilidad económica de S2 frente al precio, con matrícula de 16 participantes. 229
Tabla 3-35: Síntesis de las principales sensibilidades del escenario S2. 230
Tabla 3-36: Síntesis de criterios para la selección de la alternativa. 233
Tabla 3-37: Configuración preliminar recomendada para una eventual implementación. 237
Tabla 3-38: Brecha preliminar respecto de una eventual aprobación DGAC bajo DAN 147. 248
Tabla 3-39: Principales limitaciones y acciones de validación de la propuesta. 252

Lista de siglas, abreviaturas y normativa de referencia

Sigla	Significado	Uso dentro de la memoria
DGAC	Dirección General de Aeronáutica Civil	Autoridad aeronáutica chilena responsable de regular materias operacionales, técnicas y de seguridad aérea.
DAN	Norma Aeronáutica	Conjunto de normas emitidas por la DGAC para regular materias aeronáuticas específicas.
RPA	Remotely Piloted Aircraft	Aeronave pilotada a distancia.
RPAS	Remotely Piloted Aircraft System	Sistema de aeronave pilotada a distancia, incluyendo aeronave, estación de control, enlaces y componentes asociados.
UAS	Unmanned Aircraft System	Sistema de aeronave no tripulada; término utilizado frecuentemente en normativa y documentación internacional.
AOC	Certificado de Operador Aéreo	Certificación exigida para determinadas operaciones aéreas, incluyendo trabajos aéreos realizados con RPA/drones.
EASA	European Union Aviation Safety Agency	Agencia europea utilizada como referente normativo internacional en materias de seguridad aérea y sistemas no tripulados.
AESA	Agencia Estatal de Seguridad Aérea	Autoridad española utilizada como referencia internacional en materias de operación y mantenimiento de UAS/drones.
FAA	Federal Aviation Administration	Autoridad aeronáutica de Estados Unidos utilizada como referente internacional.
ICAO	International Civil Aviation Organization	Organismo internacional de referencia para la aviación civil y los sistemas RPAS.

Normativa y documentos de referencia

Norma o documento	Nombre o materia principal	Uso dentro de la memoria
DAN 91	Reglas del aire	Se utiliza como referencia general para el marco operacional aeronáutico aplicable a operaciones aéreas.
DAN 119	Normas para obtención de Certificado de Operador Aéreo	Se utiliza para explicar el proceso de certificación de empresas que realizan trabajos aéreos.
DAN 137	Trabajos aéreos	Se utiliza para contextualizar actividades aéreas especializadas donde pueden participar RPA/drones.
DAN 151	Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia sobre áreas pobladas	Norma central para analizar operaciones RPAS/drones sobre áreas pobladas en Chile.
DAN 43	Mantenimiento	Se utiliza como referencia comparativa del mantenimiento aeronáutico tradicional.
DAN 145	Centros de Mantenimiento Aeronáutico	Se utiliza como referencia comparativa sobre organizaciones de mantenimiento aeronáutico.
DAN 147	Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento	Se utiliza como referencia comparativa para formación técnica aeronáutica de mantenimiento.
EASA Easy Access Rules for UAS	Reglas europeas para sistemas de aeronaves no tripuladas	Se utiliza como referente internacional para operación, mantenimiento y trazabilidad en UAS/RPAS.
14 CFR Part 107	Small Unmanned Aircraft Systems (Sistemas de pequeñas aeronaves no tripuladas)	Se utiliza como referente estadounidense para operación segura de pequeños UAS.
ICAO Doc. 10019	Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (Manual sobre sistemas de aeronaves pilotadas a distancia)	Se utiliza como referencia conceptual internacional sobre RPAS como sistema aeronáutico.
ICAO RPAS CONOPS	Concept of Operations for International IFR Operations (Concepto de operaciones para operaciones IFR internacionales)	Se utiliza como referencia internacional para comprender el RPAS como sistema integrado, incluyendo aeronave, estación remota, enlace C2 y operación segura.

Introducción.

En los últimos años, el uso de aeronaves pilotadas a distancia, denominadas comúnmente drones, RPA o RPAS, ha adquirido importancia en distintas actividades industriales, civiles e institucionales, así como en tareas de inspección, monitoreo, seguridad, emergencias y apoyo operacional.[1] Estos sistemas se utilizan en ámbitos como levantamiento de información territorial, inspección de infraestructura, minería, agricultura, energía, vigilancia, emergencias y trabajos aéreos especializados. En Chile, la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) regula materias técnicas y operacionales mediante Normas Aeronáuticas, conocidas como DAN, cuyo objetivo es establecer disposiciones asociadas a la seguridad aérea y al funcionamiento del sistema aeronáutico nacional (DGAC, 2023b, 2024a).

Dentro del marco normativo nacional se encuentra la DAN 151, norma que regula las operaciones de aeronaves pilotadas a distancia sobre áreas pobladas, estableciendo requisitos y condiciones para su operación. De igual manera, la DGAC dispone de información pública sobre organizaciones, empresas y personas vinculadas a la operación de RPAS, incluyendo listados de operadores bajo DAN 91, operadores bajo DAN 151, registro de RPAS, procedimientos de registro provisorio y empresas RPAS. Adicionalmente, la autoridad publica información sobre empresas RPAS con Certificado de Operador Aéreo vigente y empresas RPAS con AOC de capacitación. Esto permite identificar que en Chile existe un ecosistema formal asociado a la operación de este tipo de aeronaves, con distintos niveles de autorización, registro y certificación según la actividad desarrollada (DGAC, 2024a, 2026a, 2026c, 2026d).

Para el caso de empresas que realizan trabajos aéreos con RPA/drones, la DGAC indica que estas deben iniciar un proceso de certificación para obtener un Certificado de Operador Aéreo

[1] La relevancia creciente del uso profesional de RPAS/drones se sustenta en antecedentes nacionales e internacionales, incluyendo su aplicación en sectores como minería, agricultura, seguridad, construcción e inspección de infraestructura, además de la existencia de empresas RPAS con AOC vigente y AOC de capacitación en Chile (Diario Financiero, 2024; DGAC, 2026a, 2026c, 2026d; The Insight Partners, 2026).

(AOC), conforme a la DAN 119, norma asociada a la obtención de dicho certificado. Esta exigencia considera antecedentes como razón social, ubicación de base principal, representante legal, tipo de operación aérea propuesta y tipo de aeronave utilizada, entre otros elementos. Lo anterior refuerza la necesidad de estudiar no solo la operación de drones, sino también los aspectos técnicos que permiten sostener su funcionamiento seguro, confiable y trazable en el tiempo (DGAC, 2025b).

Sin embargo, aunque la regulación nacional ha avanzado en materias de operación, autorización, registro y certificación de operadores, el mantenimiento de RPAS presenta una problemática específica. Los drones no solo requieren criterios aeronáuticos generales, sino también conocimientos vinculados a electricidad, electrónica, baterías, sensores, telecomunicaciones, software, navegación satelital, cargas útiles, estructuras livianas y sistemas de control. Por esta razón, el mantenimiento de RPAS no puede analizarse únicamente como una extensión simplificada del mantenimiento aeronáutico convencional, ya que integra componentes propios de una aeronave con tecnologías digitales, comunicaciones inalámbricas, automatización y procesamiento de información.

A nivel internacional, la European Union Aviation Safety Agency (EASA), Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea, ha incorporado dentro de sus reglas para sistemas de aeronaves no tripuladas referencias al mantenimiento, incluyendo instrucciones documentadas, registros de mantenimiento y personal autorizado para realizar estas actividades. Esto muestra que, en marcos regulatorios más desarrollados, el mantenimiento de UAS/RPAS se reconoce como un componente relevante para mantener condiciones seguras de operación y trazabilidad técnica (EASA, 2024).

Debido a lo anterior, resulta pertinente analizar si la formación actual del Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico (TUMA) de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM) puede servir como base para el desarrollo de competencias específicas asociadas al mantenimiento de RPAS. La carrera contempla formación en mantenimiento preventivo, correctivo y recuperativo de aeronaves, motores y sistemas, además de asignaturas ligadas a gestión del mantenimiento aeronáutico, sistemas eléctricos, sistemas

digitales, sistemas electrónicos, aviónica, seguridad operacional y microprocesadores. Estas áreas entregan una base técnica relacionada con varios componentes presentes en drones y RPAS; sin embargo, se requiere evaluar si dicha formación resulta suficiente o si debe complementarse mediante contenidos especializados orientados a estos sistemas (USM, s. f.-b.).

A partir de esta problemática, la presente memoria evalúa la pertinencia técnica, normativa y curricular de incorporar formación especializada en mantenimiento de RPAS/drones dentro del área aeronáutica de la Universidad Técnica Federico Santa María. Para ello, se revisó el marco normativo chileno e internacional, se identificaron actores nacionales vinculados a la operación, utilización, capacitación y mantenimiento de drones, se caracterizaron los principales requerimientos técnicos de estos sistemas y se contrastaron con el perfil de egreso y las capacidades formativas existentes en la carrera Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico.

El propósito de la investigación fue identificar las competencias técnicas, normativas, documentales y de seguridad operacional pertinentes para el mantenimiento profesional de RPAS/drones. A partir de este diagnóstico, se evaluaron distintas alternativas de incorporación formativa y se desarrolló una propuesta académica fundamentada, cuya modalidad no fue establecida previamente. Posteriormente, se analizaron sus condiciones preliminares de puesta en marcha mediante un modelo técnico-económico, considerando requerimientos curriculares, operacionales y económico-financieros.

Capítulo 1.

Antecedentes Generales

1 Antecedentes Generales,

1.1 Justificación

El uso de aeronaves pilotadas a distancia (RPA, por sus siglas en inglés Remotely Piloted Aircraft) y de los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS, por sus siglas en inglés Remotely Piloted Aircraft System), conocidos comúnmente como drones, se encuentra regulado en Chile por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC). Entre las principales referencias normativas aplicables a su operación se encuentran la DAN 151, *Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas*, y la DAN 91, *Reglas del aire*. De acuerdo con la información publicada por la DGAC, para operar un RPAS se requiere contar, según corresponda, con credencial de piloto a distancia, autorización de operación y tarjeta de registro del equipo. En el caso de la credencial para operaciones en áreas pobladas, se exige tener al menos 18 años, acreditar instrucción teórica y práctica respecto del modelo de RPAS a operar y aprobar el examen correspondiente (DGAC, s. f., 2023b, 2024a).

La formalización regulatoria de estas operaciones se desarrolla paralelamente a una utilización creciente de drones en actividades profesionales e industriales. En Chile se han identificado aplicaciones en sectores como minería, agricultura, seguridad y construcción, incluyendo vigilancia, inspección de infraestructura, revisión de torres de alta tensión, fumigación, pulverización y geomensura (Diario Financiero, 2024). Esta diversidad de aplicaciones permite observar que los RPAS no constituyen únicamente equipos de uso recreativo, sino herramientas empleadas en actividades donde su disponibilidad, condición técnica y confiabilidad pueden adquirir relevancia operacional.

Estas aplicaciones se insertan, además, en procesos de transformación digital caracterizados por una mayor utilización de automatización, sensores, captura remota de información y sistemas conectados para apoyar actividades productivas y de inspección. En este contexto, la capacidad de mantener técnicamente los RPAS constituye un elemento necesario para sostener su disponibilidad, confiabilidad y utilización segura.

La DAN 151 establece requisitos técnicos aplicables a los RPA que operan sobre áreas pobladas, entre los que se encuentran un peso máximo de despegue de hasta 9 kg, construcción o armado a partir de un kit de fábrica, disponibilidad de instructivos técnicos de operación, número de serie o registro DGAC, paracaídas de emergencia y capacidad de control manual. Estos requisitos muestran que la autoridad no solo regula la conducta operacional del piloto, sino también determinadas condiciones técnicas mínimas que debe cumplir la aeronave para su utilización (DGAC, 2024a).

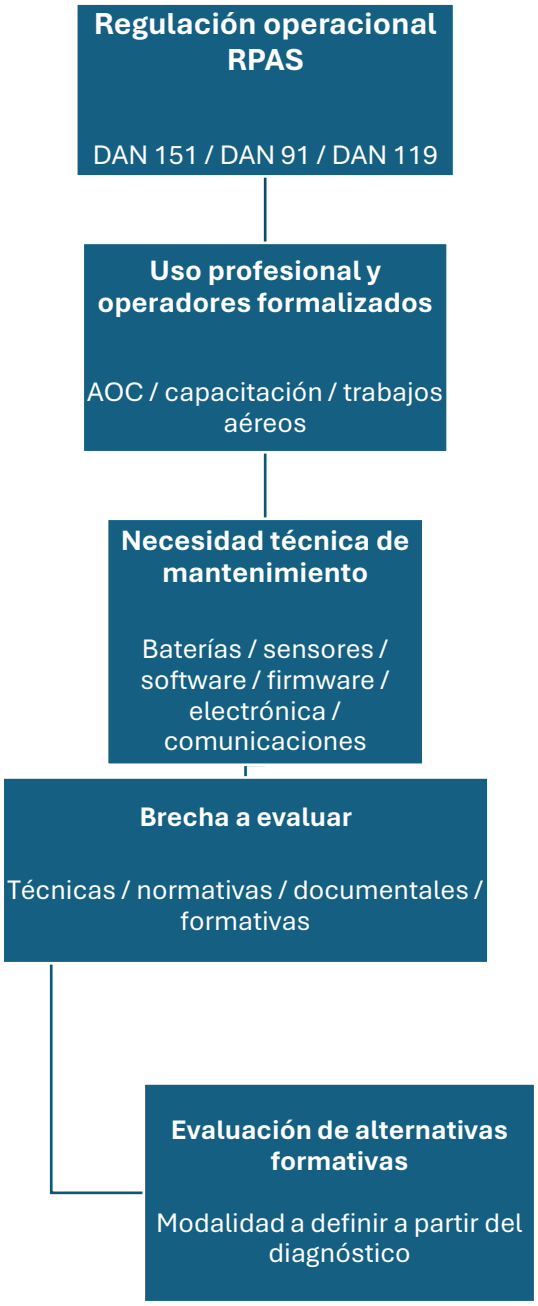
La misma norma establece una distinción entre operaciones sobre áreas pobladas con fines de lucro y sin fines de lucro. Para las operaciones con fines de lucro se requiere la obtención previa de un Certificado de Operador Aéreo (AOC), mientras que para las operaciones sin fines de lucro se contempla un Certificado Especial de Operación, incluyendo organismos del Estado. Esto permite identificar que los RPAS forman parte de un sistema formal de autorización y control operacional, especialmente cuando son utilizados en trabajos aéreos, servicios especializados o actividades de interés público (DGAC, 2024a).

Los registros publicados por la DGAC incluyen antecedentes sobre empresas vinculadas a RPAS, operadores con Certificado de Operador Aéreo vigente y entidades asociadas a capacitación. Estos antecedentes evidencian la existencia de actores formalmente incorporados al sistema aeronáutico nacional y justifican analizar no solo las condiciones necesarias para operar estos sistemas, sino también aquellas asociadas a la conservación de su condición técnica y a la trazabilidad de las intervenciones realizadas sobre ellos (DGAC, 2026c, 2026d).

En el caso de las operaciones que requieren certificación como operador aéreo, resulta relevante la DAN 119, Normas para obtención de Certificado de Operador Aéreo (AOC). Esta norma establece los requisitos aplicables al proceso de certificación. Para el caso de operadores de RPAS/drones, la documentación y antecedentes exigidos permiten identificar formalmente las aeronaves utilizadas, su base de operación y las responsabilidades asociadas a la actividad aérea, junto con procedimientos de coordinación y comunicación entre quienes participan en la operación. Estos elementos refuerzan la existencia de una estructura formal

para el uso profesional de RPAS, especialmente en actividades sujetas a certificación por parte de la autoridad aeronáutica (DGAC, 2025b).

Sin embargo, al revisar el enfoque normativo disponible, se observa que la regulación chilena aplicable a RPAS se concentra principalmente en materias de operación, registro, credenciales, autorización, certificación de operadores, condiciones técnicas mínimas y seguridad operacional. La DAN 151 estructura sus disposiciones en materias como generalidades, reglas de operación, registro de RPA y credencial de piloto a distancia, sin desarrollar un capítulo equivalente a un programa específico de mantenimiento de RPAS ni una estructura de formación de personal técnico especializado en su mantenimiento. Esta situación permite plantear, como materia de investigación, una posible brecha entre el grado de formalización alcanzado por la operación de RPAS y la formalización técnica y formativa asociada a su mantenimiento (DGAC, 2024a).



Figuras 1-1:*Relación entre regulación operacional, uso profesional de RPAS, necesidad de mantenimiento y evaluación de una alternativa formativa.*

Fuente: *Elaboración propia con base en DGAC (2023b, 2024a, 2025b, 2026d), ICAO (2015, 2017) y USM (s. f.-b).*

Nota: *La secuencia representa el planteamiento conceptual de la investigación. La modalidad formativa no se define a priori, sino a partir del diagnóstico, el levantamiento de información y el análisis de brechas desarrollado posteriormente.*

Esta posible brecha adquiere relevancia debido a que un RPAS no corresponde únicamente a una aeronave de menor tamaño, sino a un sistema integrado por estructura, propulsión, baterías, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware, sistemas de control, estación de pilotaje remoto y cargas útiles. En consecuencia, su mantenimiento puede requerir la combinación de conocimientos aeronáuticos con competencias relacionadas con electricidad, electrónica, telecomunicaciones, diagnóstico de fallas, sistemas digitales, seguridad operacional y documentación técnica (ICAO, 2015, 2017).

Bajo este contexto, la carrera de Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico (TUMA) de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM) constituye una referencia curricular institucional pertinente para evaluar la incorporación de competencias asociadas al mantenimiento de RPAS. La carrera declara una formación orientada al mantenimiento preventivo, correctivo y recuperativo de aeronaves, motores y sistemas, incluyendo intervenciones mecánicas, electrónicas y de software de control. Además, su plan de estudios contempla áreas vinculadas con gestión del mantenimiento aeronáutico, sistemas eléctricos, sistemas digitales, sistemas electrónicos, microprocesadores, aviónica y seguridad operacional, las cuales presentan relación con distintos sistemas presentes en RPAS/drones (USM, s. f.-b).

La utilización de TUMA como referencia curricular institucional no implica, sin embargo, que una eventual alternativa formativa deba estar dirigida exclusivamente a sus estudiantes, egresados o titulados. Su formación permite disponer de capacidades académicas relacionadas con el ámbito aeronáutico sobre las cuales efectuar el análisis de brechas, mientras que la eventual propuesta puede resultar también pertinente para personas provenientes de áreas técnicas o profesionales afines que cuenten con conocimientos compatibles en mantenimiento, electricidad, electrónica, telecomunicaciones, sistemas digitales, operación RPAS u otras disciplinas relacionadas.

Por lo tanto, el punto de partida de esta investigación corresponde a la coexistencia de un marco regulatorio que establece mecanismos formales para la operación profesional de RPAS y una formación técnica aeronáutica que ya dispone de capacidades relacionadas con

mantenimiento, electricidad, electrónica, aviónica y seguridad operacional. No obstante, se requiere determinar en qué medida estas capacidades responden a las particularidades del mantenimiento de RPAS/drones y qué brechas técnicas, normativas, documentales o formativas requieren ser complementadas.

La respuesta académica frente a dichas brechas no se establece de manera previa. La investigación considera el diagnóstico normativo y técnico, el levantamiento de información con actores vinculados al sector, el análisis curricular y la identificación de brechas como antecedentes para evaluar posteriormente distintas alternativas de incorporación formativa. Estas pueden comprender, entre otras opciones, la creación de una nueva oferta académica, la incorporación o articulación de contenidos con formación existente, programas de mayor extensión o alternativas de educación continua. La selección de una modalidad específica deberá fundamentarse en su pertinencia técnica y formativa, la profundidad requerida, el público objetivo, las capacidades disponibles en la USM y su factibilidad preliminar de implementación.

De esta manera, la investigación busca llegar a una alternativa académica fundamentada para incorporar competencias asociadas al mantenimiento de RPAS dentro de la oferta formativa vinculada al área aeronáutica de la USM. Para ello, se analiza el marco normativo chileno e internacional, se consideran antecedentes provenientes de actores nacionales vinculados a la operación, utilización, capacitación y mantenimiento de drones, se caracterizan los principales requerimientos técnicos de estos sistemas y se contrastan dichas necesidades con las capacidades formativas disponibles. TUMA constituye una referencia curricular institucional relevante dentro de este análisis, sin limitar a sus estudiantes, egresados o titulados el potencial público objetivo de la alternativa propuesta.

El aporte del trabajo consiste en entregar una evaluación técnica, normativa y curricular que permita determinar la pertinencia de incorporar formación especializada en mantenimiento de RPAS/drones en la Universidad Técnica Federico Santa María. A partir del diagnóstico desarrollado, se busca definir una alternativa formativa orientada a fortalecer competencias técnicas, documentales y de seguridad operacional, aportar a una mayor profesionalización

del sector y contribuir a la confiabilidad y trazabilidad técnica de estos sistemas. El fortalecimiento de estas capacidades puede generar beneficios académicos y sectoriales al favorecer prácticas de inspección, diagnóstico, documentación y mantenimiento más sistemáticas; desde una perspectiva organizacional, puede contribuir a una mejor utilización y disponibilidad de los equipos, aunque estos efectos económicos no son cuantificados directamente en la presente investigación. Asimismo, una mayor capacidad técnica puede aportar a una utilización más segura de RPAS en actividades profesionales, productivas e institucionales. Entre los principales grupos de interés se encuentran la USM, estudiantes y egresados de carreras técnicas, profesionales de áreas afines, operadores y empresas RPAS, organismos públicos, servicios técnicos y organizaciones que utilizan drones dentro de sus actividades.

1.1.1 Pregunta clave de la investigación

A partir de la problemática y de los antecedentes expuestos, la investigación busca responder la siguiente pregunta:

¿Qué alternativa formativa puede desarrollar la Universidad Técnica Federico Santa María para responder a las brechas técnicas, normativas, documentales y formativas identificadas en el mantenimiento profesional de RPAS/drones, considerando los perfiles técnicos y actores vinculados al sector, y bajo qué condiciones curriculares, operacionales, de recursos y económico-financieras evaluadas mediante cobertura formativa, capacidad práctica, matrícula, precio de equilibrio y Valor Actual Neto resulta preliminarmente factible su implementación?

Para efectos de estructuración del problema conforme al enfoque TOSCA, el Trouble corresponde a la brecha entre la formalización operacional de los RPAS y el grado de sistematización técnica, documental y formativa observado en su mantenimiento. El Owner se identifica en la Universidad Técnica Federico Santa María, a través de las unidades académicas y de Educación Continua competentes para evaluar una eventual respuesta formativa. Los Actors comprenden estudiantes y egresados, técnicos y profesionales de áreas

afines, operadores y empresas RPAS, organismos públicos, servicios técnicos y organizaciones usuarias de estas tecnologías. Las principales Constraints corresponden al alcance curricular requerido, la capacidad práctica e infraestructura disponible, los recursos humanos y equipamiento, el marco regulatorio aplicable y las condiciones económico-financieras de implementación. Finalmente, el Success se evalúa mediante la selección de una alternativa que cumpla los requerimientos curriculares definidos, resulte ejecutable dentro de las restricciones operacionales establecidas y presente condiciones económicas verificables mediante indicadores de capacidad, equilibrio y Valor Actual Neto.

La pregunta articula el diagnóstico del problema con la evaluación de alternativas formativas y su posterior análisis de puesta en marcha. En este sentido, la respuesta no se limita a determinar la existencia de una necesidad formativa, sino que busca establecer qué modalidad resulta más pertinente para el contexto analizado y cuáles son las condiciones necesarias para una eventual implementación.

1.2 Objetivos

Objetivo General

Evaluar, con base en antecedentes disponibles hasta el año 2026, las competencias técnicas, normativas y formativas requeridas para la profesionalización del mantenimiento de RPAS/drones, considerando las necesidades del sector, el marco regulatorio chileno, referentes internacionales y la formación aeronáutica existente en la Universidad Técnica Federico Santa María, con el fin de desarrollar una alternativa formativa pertinente y evaluar preliminarmente las condiciones técnicas, operacionales y económico-financieras asociadas a su eventual implementación.

Objetivos Específicos

1. Identificar los antecedentes normativos, técnicos, sectoriales y formativos relevantes para el mantenimiento profesional de RPAS/drones en Chile, mediante la revisión del marco regulatorio nacional, referentes internacionales, actores vinculados al sector,

prácticas observadas y requerimientos técnicos de estos sistemas, con el propósito de establecer una base diagnóstica para la investigación.

2. Analizar las brechas técnicas, normativas, documentales y formativas asociadas al mantenimiento de RPAS/drones, contrastando los requerimientos identificados con las prácticas observadas en el sector y con las capacidades formativas existentes en la Universidad Técnica Federico Santa María, particularmente en el área de mantenimiento aeronáutico, con el fin de establecer las necesidades que deberá abordar una eventual respuesta formativa.
3. Desarrollar una alternativa formativa especializada en mantenimiento de RPAS/drones a partir de la evaluación y selección de distintas modalidades de incorporación académica, definiendo su público objetivo, perfiles de ingreso y egreso, resultados de aprendizaje, estructura modular, contenidos, carga horaria, actividades prácticas, evaluación y requerimientos básicos de implementación, en coherencia con las brechas identificadas y las capacidades académicas disponibles en la Universidad.
4. Proponer las condiciones preliminares de puesta en marcha de la alternativa formativa desarrollada mediante un modelo técnico-económico de apoyo a la decisión, considerando cobertura curricular, capacidad práctica, recursos humanos, infraestructura, equipamiento, inversión, costos, matrícula, precio, puntos de equilibrio, Valor Actual Neto y análisis de sensibilidad, con el propósito de establecer una configuración de implementación susceptible de validación académica, institucional y comercial.

Los objetivos específicos se desarrollan secuencialmente dentro del período de ejecución de la presente memoria, con cierre documental de antecedentes en 2026, conforme a las etapas metodológicas definidas en la Sección 1.3.

1.3 Metodología y teoría

La presente memoria corresponde a una investigación de carácter exploratorio, descriptivo y propositivo, orientada a evaluar la pertinencia de incorporar formación especializada asociada al mantenimiento de RPAS/drones en el área aeronáutica de la Universidad Técnica

Federico Santa María. El propósito metodológico consiste en identificar las competencias técnicas, normativas, documentales y de seguridad operacional requeridas para el mantenimiento de estos sistemas, determinar las brechas existentes respecto de la formación disponible y, a partir de los antecedentes obtenidos, evaluar y seleccionar una alternativa formativa pertinente.

El carácter exploratorio se relaciona con el estudio de un ámbito que presenta un menor grado de desarrollo y sistematización en el contexto nacional desde la perspectiva específica del mantenimiento de RPAS/drones. El carácter descriptivo se refleja en la revisión del marco regulatorio, la identificación de actores, la caracterización técnica de los sistemas RPAS, el levantamiento de prácticas de mantenimiento y el análisis de la formación actualmente disponible. Finalmente, el carácter propositivo se expresa en la evaluación, selección y diseño de una alternativa académica orientada a responder a las brechas identificadas, sin establecer previamente una modalidad específica de implementación.

La investigación presenta un enfoque predominantemente cualitativo, sustentado en revisión normativa, documental y curricular, complementado mediante información obtenida desde actores vinculados a la operación, utilización, regulación, capacitación o mantenimiento de RPAS/drones. Este componente se complementa posteriormente con una evaluación cuantitativa de carácter técnico-económico, utilizada para analizar las condiciones preliminares de puesta en marcha de la alternativa formativa seleccionada. La incorporación de este componente cuantitativo no tiene por finalidad estimar la demanda futura del programa, sino evaluar distintos escenarios de implementación bajo supuestos explícitos y modificables.

La información utilizada se obtuvo a partir de fuentes primarias y secundarias. Las fuentes primarias corresponden principalmente a entrevistas semiestructuradas, respuestas recibidas mediante contacto directo y antecedentes proporcionados por organismos públicos a través de solicitudes efectuadas conforme a la Ley N.º 20.285 sobre Acceso a la Información Pública, conocida como Ley de Transparencia. Las fuentes secundarias comprenden normativa aeronáutica, registros y publicaciones institucionales, documentación técnica de

fabricantes, antecedentes de servicios técnicos, programas de capacitación, referentes internacionales y documentación curricular de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Debido al carácter exploratorio del estudio, la selección de actores se realizó de manera intencional, buscando incorporar fuentes que permitieran representar distintos ámbitos relacionados con RPAS/drones, tales como regulación, operación, utilización institucional, capacitación y mantenimiento. Por lo tanto, la muestra no pretende representar estadísticamente la totalidad del mercado nacional ni estimar parámetros poblacionales. Su finalidad es obtener antecedentes pertinentes que permitan caracterizar prácticas, necesidades técnicas y brechas relevantes para los objetivos de la investigación.

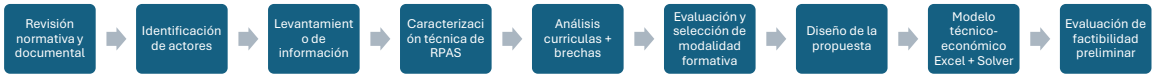
Los antecedentes obtenidos fueron contrastados entre distintas fuentes normativas, institucionales, técnicas, formativas y sectoriales. Este contraste permite evitar que la caracterización del problema o la propuesta académica dependan exclusivamente de una única fuente de información y facilita la identificación de coincidencias, diferencias y elementos recurrentes entre el marco normativo, las prácticas observadas y la formación actualmente disponible.

La selección de los métodos y herramientas utilizados responde al carácter exploratorio y aplicado de la investigación y a su relación con los objetivos planteados. La revisión normativa y documental permite establecer un marco verificable para interpretar la regulación y los requerimientos técnicos; las entrevistas semiestructuradas permiten profundizar en materias que no se encuentran completamente desarrolladas en fuentes públicas; y las solicitudes de acceso a información pública permiten obtener antecedentes institucionales formales sobre utilización, mantenimiento, registros y capacitación asociados a RPAS. El análisis curricular permite contrastar los requerimientos identificados con capacidades formativas existentes en la USM, mientras que el análisis de brechas permite estructurar las diferencias entre la situación observada y la condición formativa considerada deseable. Finalmente, Microsoft Excel se utiliza para implementar el modelo técnico-económico debido a que permite mantener parámetros editables, relaciones de cálculo trazables y análisis de escenarios, mientras que Solver se incorpora de manera

complementaria para apoyar la selección entre alternativas sujetas a restricciones curriculares.

Estas herramientas fueron seleccionadas considerando su pertinencia respecto de los objetivos, el acceso disponible a información, los recursos existentes y el plazo de desarrollo de la memoria. El enfoque incorpora, además, principios asociados a la calidad total y la mejora continua mediante la trazabilidad documental, la estandarización de procedimientos, la verificación de resultados y la utilización de información técnica para apoyar decisiones reproducibles. Asimismo, considera tendencias actuales del entorno industrial vinculadas con digitalización, automatización e integración de sistemas electrónicos, software, sensores y datos, características presentes en el desarrollo y utilización profesional de los RPAS. De esta manera, la metodología permite transformar antecedentes normativos, técnicos, sectoriales y curriculares en criterios verificables para el análisis de brechas, el diseño de la alternativa formativa y su posterior evaluación de puesta en marcha.

A partir de esta metodología, el trabajo se estructuró en etapas sucesivas:



Figuras 1-2:*Secuencia metodológica de la investigación.*

Fuente: *Elaboración propia.*

Nota: *La selección de la modalidad formativa se realiza posteriormente al diagnóstico y análisis de brechas. La evaluación técnico-económica se aplica sobre la alternativa seleccionada y no determina por sí sola su pertinencia académica.*

1. **Revisión Normativa nacional e internacional**

   Se revisó la normativa chilena relacionada con RPAS/drones, considerando materias de operación, registro, certificación de operadores, trabajos aéreos, mantenimiento aeronáutico y formación de personal técnico. Entre las normas analizadas se encuentran la DAN 151, *Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas*; la DAN 91, *Reglas del aire*; la DAN 119, *Normas para*

obtención de Certificado de Operador Aéreo (AOC); y la DAN 137, *Trabajos aéreos*. Como referencias comparativas del mantenimiento aeronáutico y de la formación técnica se consideraron además la DAN 43, *Mantenimiento*; la DAN 145, *Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)*; y la DAN 147, *Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento*.

De manera complementaria, se revisaron referentes internacionales asociados a sistemas de aeronaves no tripuladas, mantenimiento, documentación técnica, competencias del personal, seguridad operacional y trazabilidad. Estos antecedentes fueron utilizados con fines comparativos y no como sustitutos de la normativa chilena aplicable.

2. Identificación de actores nacionales

Se identificaron actores nacionales vinculados al uso, operación, certificación, capacitación o mantenimiento de RPAS/drones, incluyendo empresas certificadas, organismos públicos, instituciones usuarias de drones, servicios técnicos especializados, entidades de capacitación y proveedores del sector. La selección tuvo un carácter exploratorio e intencional y no buscó abarcar la totalidad del mercado nacional, sino incorporar antecedentes provenientes de distintos tipos de actores relevantes para el problema estudiado.

3. Levantamiento de información primaria y secundaria

Se recopiló información mediante entrevistas semiestructuradas, contactos por correo electrónico, solicitudes de acceso a información pública y revisión de documentación institucional y técnica. Esta etapa permitió incorporar antecedentes provenientes de organismos públicos, actores vinculados al uso profesional de RPAS/drones, servicios técnicos y entidades de capacitación.

El levantamiento se orientó a caracterizar prácticas actuales de mantenimiento, componentes que requieren mayor atención, mecanismos de registro y trazabilidad, competencias técnicas consideradas necesarias y percepciones respecto de una eventual mayor diferenciación entre funciones de operación, mantenimiento y gestión técnica. Las respuestas obtenidas fueron utilizadas como antecedentes exploratorios y contrastadas con la revisión normativa, técnica y documental.

4. Caracterización técnica del mantenimiento de RPAS

Se analizaron los principales sistemas que integran un RPAS, considerando estructura, propulsión eléctrica, baterías, sensores, sistemas electrónicos, navegación, comunicaciones, software, firmware, sistemas de control y cargas útiles. Asimismo, se incorporaron aspectos asociados a seguridad operacional, pérdida o degradación de enlaces, interferencias, confiabilidad de sensores y condiciones necesarias para mantener una operación segura.

A partir de esta caracterización se identificaron conocimientos y competencias asociados a inspección, diagnóstico, mantenimiento preventivo y correctivo, interpretación de documentación técnica, utilización de procedimientos de fabricante y trazabilidad de las intervenciones realizadas sobre el sistema.

5. Análisis curricular y determinación de brechas.

Se revisaron el perfil de egreso, plan de estudios y asignaturas de la carrera Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico (TUMA) de la Universidad Técnica Federico Santa María. Los contenidos y competencias identificados se contrastaron con los requerimientos técnicos obtenidos durante las etapas anteriores, permitiendo establecer qué capacidades presentan una cobertura previa, cuáles requieren adaptación al contexto RPAS y cuáles necesitan una incorporación específica.

El análisis de brechas se organizó en dimensiones normativa, técnica, documental y formativa, considerando además aspectos relacionados con procedimientos de fabricante y seguridad operacional. Esta etapa permitió transformar los antecedentes obtenidos durante la investigación en requerimientos concretos para una posible alternativa académica.

6. **Evaluación, selección y diseño de la alternativa formativa.**

A partir de las brechas identificadas se evaluaron distintas posibilidades de incorporación formativa, considerando alternativas de diferente profundidad, alcance y complejidad institucional. La comparación tuvo en cuenta aspectos como el público objetivo, las competencias requeridas, las capacidades académicas existentes en la USM, la necesidad de actividades prácticas y la factibilidad preliminar de implementación.

Como resultado de esta evaluación se seleccionó posteriormente una modalidad de educación continua con enfoque de especialización técnica, la cual fue desarrollada mediante la definición de perfil de ingreso y egreso, resultados de aprendizaje, estructura modular, contenidos mínimos, actividades prácticas, mecanismos de evaluación y requerimientos básicos de implementación. La selección de esta modalidad no se estableció de manera previa al diagnóstico, sino que corresponde a un resultado del análisis desarrollado en la investigación.

7. **Evaluación preliminar de puesta en marcha mediante modelo técnico-económico.**

Finalmente, se realizó una evaluación preliminar de la puesta en marcha de la alternativa seleccionada mediante un modelo técnico-económico de apoyo a la decisión implementado en Microsoft Excel. El modelo relaciona la estructura curricular con variables de implementación asociadas a duración, horas teóricas y

prácticas, recursos docentes, capacidad de laboratorio, equipamiento, inversión inicial, costos de ejecución, matrícula, precio y evaluación económico-financiera.

La planilla de cálculo fue estructurada mediante parámetros editables, fórmulas, restricciones y escenarios, permitiendo revisar los supuestos y reproducir los resultados obtenidos. De manera complementaria, se utilizó Solver de Microsoft Excel para apoyar la selección entre alternativas académicamente factibles, manteniendo como condición previa el cumplimiento de los requerimientos curriculares definidos para la propuesta.

El modelo no se utiliza como herramienta de pronóstico de demanda ni busca sustituir una evaluación financiera institucional definitiva. Su propósito es analizar distintas configuraciones de implementación bajo condiciones explícitas y trazables, identificando sus requerimientos técnicos, operacionales y económico-financieros. De esta manera, la evaluación de la propuesta no se limita a la elaboración de un presupuesto, sino que permite analizar conjuntamente su suficiencia formativa, disponibilidad de recursos y factibilidad preliminar de puesta en marcha.

1.4 Alcance

La presente memoria tiene un alcance exploratorio, descriptivo y propositivo. Su carácter exploratorio se relaciona con el análisis del mantenimiento de RPAS/drones como un ámbito que presenta un menor grado de sistematización dentro de la formación técnica aeronáutica nacional. El componente descriptivo comprende la revisión del marco normativo, los actores vinculados al sector, las aplicaciones profesionales de RPAS, las prácticas de mantenimiento identificadas, los requerimientos técnicos de estos sistemas y la formación actualmente disponible. Finalmente, el carácter propositivo se expresa en la evaluación de distintas alternativas de incorporación formativa y en el posterior diseño de aquella considerada más pertinente para responder a las brechas identificadas.

El alcance geográfico del estudio corresponde principalmente a Chile. En este contexto, se analiza la normativa emitida por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC) y

antecedentes asociados a la operación, certificación, capacitación, utilización y mantenimiento de RPAS/drones en el país. De manera complementaria, se revisan referentes internacionales provenientes de organismos y autoridades aeronáuticas extranjeras con fines comparativos, particularmente en materias de mantenimiento, documentación técnica, competencias del personal, trazabilidad y seguridad operacional. Estos referentes no sustituyen la normativa nacional ni se interpretan como directamente aplicables al contexto chileno.

El alcance temporal comprende la normativa, información pública, registros, antecedentes técnicos, documentación institucional y fuentes disponibles hasta el cierre documental de la investigación durante el año 2026. Debido a que la regulación, tecnologías, oferta formativa y aplicaciones de RPAS/drones pueden evolucionar, los resultados deben interpretarse en función de los antecedentes disponibles durante dicho periodo.

El estudio se concentra en RPAS/drones utilizados en contextos profesionales, técnicos, institucionales, industriales, de capacitación o de servicios especializados. El uso exclusivamente recreativo no constituye un foco principal de la investigación, salvo cuando resulta necesario diferenciarlo de operaciones profesionales o reguladas. Tampoco se desarrolla en profundidad el empleo militar de RPAS, ni se realiza un estudio especializado de ciberseguridad, guerra electrónica o interferencia deliberada de señales. Estos últimos elementos se consideran únicamente cuando presentan relación directa con la seguridad operacional, las comunicaciones, la confiabilidad técnica, el diagnóstico o las competencias requeridas para el mantenimiento.

Respecto del levantamiento de información, la investigación no pretende representar estadísticamente la totalidad del mercado nacional de RPAS/drones. Se utiliza una muestra exploratoria e intencional compuesta por actores considerados relevantes para los objetivos del estudio, incluyendo organismos públicos, empresas u operadores vinculados al sector, servicios técnicos, entidades de capacitación y usuarios institucionales o productivos. La información fue obtenida mediante entrevistas semiestructuradas, contactos por correo

electrónico, solicitudes realizadas conforme a la Ley N.º 20.285 sobre Acceso a la Información Pública y revisión de antecedentes documentales.

En consecuencia, los resultados derivados del levantamiento permiten identificar prácticas, necesidades y patrones observados entre las fuentes y actores consultados, pero no deben interpretarse como estimaciones representativas de la totalidad de empresas, operadores, técnicos o usuarios de RPAS existentes en Chile. Los antecedentes recopilados fueron utilizados principalmente para complementar la revisión normativa y técnica, contrastar los requerimientos identificados y sustentar el posterior análisis de brechas.

En el ámbito académico, la memoria evalúa distintas formas de incorporar formación especializada en mantenimiento de RPAS/drones y selecciona una alternativa compatible con las brechas detectadas, el público objetivo y las capacidades consideradas para la Universidad Técnica Federico Santa María. El trabajo no contempla la creación formal de una nueva carrera, la modificación efectiva de planes de estudio vigentes, la aprobación institucional de un programa académico ni la ejecución piloto de la propuesta. La carrera de Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico (TUMA) constituye la principal referencia curricular del análisis, pero no limita el potencial público objetivo de la alternativa formativa seleccionada, pudiendo esta orientarse también a técnicos o profesionales de áreas afines que cuenten con una base compatible.

La propuesta desarrollada corresponde finalmente a una alternativa de educación continua con enfoque de especialización técnica en mantenimiento de RPAS/drones. Su selección constituye un resultado del diagnóstico y de la comparación de alternativas realizada durante la investigación y no una condición establecida previamente. El diseño desarrollado define su orientación, público objetivo, resultados de aprendizaje, estructura modular, contenidos, actividades prácticas, mecanismos de evaluación y requerimientos básicos de implementación. No obstante, la propuesta no constituye por sí misma una certificación, licencia o habilitación oficial para desempeñarse como mantenedor de RPAS/drones, ni reemplaza los requisitos que puedan establecer la autoridad aeronáutica, fabricantes u otros organismos competentes.

Finalmente, la memoria incorpora una evaluación preliminar de puesta en marcha mediante un modelo técnico-económico de apoyo a la decisión implementado en Microsoft Excel, complementado con Solver para la selección entre alternativas curricularmente factibles. El modelo considera variables asociadas a duración y cobertura curricular, recursos docentes, infraestructura, capacidad práctica, equipamiento, inversión inicial, costos de operación, matrícula, precio y evaluación económico-financiera.

Esta evaluación corresponde a un análisis de escenarios y no a un estudio de demanda de mercado ni a una evaluación financiera institucional definitiva. En consecuencia, los valores de matrícula, precio, cantidad de versiones y otros parámetros definidos como supuestos no deben interpretarse como demanda proyectada, tarifas oficiales o compromisos institucionales. Su función es permitir analizar las condiciones bajo las cuales una alternativa académicamente pertinente podría alcanzar factibilidad operativa y sostenibilidad económica preliminar. Los parámetros pueden ser actualizados si posteriormente se dispone de antecedentes institucionales, comerciales o de mercado más precisos.

La investigación presenta además una relación directa con el perfil de egreso de Ingeniería en Aviación Comercial de la Universidad Técnica Federico Santa María. En primer lugar, se vincula con la dimensión aeronáutica, de calidad y seguridad, mediante el análisis de normativa, seguridad operacional, condición técnica, trazabilidad y mantenimiento de sistemas RPAS. En segundo lugar, se relaciona con los conocimientos de administración, gestión, legislación, economía y finanzas declarados en el perfil, a través de la evaluación de alternativas formativas, el análisis de requisitos institucionales y la construcción de un modelo técnico-económico para estudiar preliminarmente su puesta en marcha. Finalmente, el trabajo se vincula con la capacidad de desenvolverse en empresas y organizaciones del ámbito aeroespacial, al abordar una problemática emergente de la aviación civil y traducirla en una propuesta académica susceptible de apoyar futuras decisiones institucionales. Estas relaciones no implican que la memoria abarque la totalidad de las competencias del perfil de egreso, sino que permiten identificar los ámbitos de formación que se aplican de manera directa en el desarrollo del proyecto.

Entre las principales limitaciones metodológicas de la investigación se encuentra el carácter exploratorio de la muestra y, por consiguiente, la imposibilidad de representar estadísticamente la totalidad del sector RPAS nacional. Esta limitación se aborda mediante el contraste de antecedentes provenientes de distintas fuentes, incluyendo normativa, entrevista institucional, organismos públicos, documentación técnica de fabricantes, servicios especializados y entidades de capacitación. Asimismo, determinados parámetros operacionales y económicos no disponen todavía de valores institucionales definitivos, por lo que el modelo técnico-económico distingue explícitamente entre antecedentes respaldados, cotizaciones y supuestos de modelación, manteniéndolos editables para su posterior actualización. Finalmente, la investigación no incorpora un estudio específico de demanda o disposición a pagar; por esta razón, la matrícula, el precio y la cantidad de versiones consideradas en el modelo se utilizan como escenarios de evaluación y no como proyecciones comerciales, complementándose posteriormente mediante análisis de equilibrio y sensibilidad.

CAPÍTULO 2
ESTADO DEL ARTE

2 Estado del Arte

2.1 Antecedentes del sector.

Los sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS), comúnmente conocidos como drones, han evolucionado desde aplicaciones principalmente recreativas o audiovisuales hacia usos profesionales, industriales e institucionales. En Chile, su operación se encuentra regulada por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), principalmente mediante la DAN 151, *Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas*, y la DAN 91, *Reglas del aire*. Estas normas establecen requisitos relacionados con la operación, credencial del piloto a distancia, registro del equipo y autorización otorgada por la autoridad aeronáutica (DGAC, 2023b, 2024a).

El desarrollo del sector también puede observarse en la cantidad de aeronaves incorporadas al sistema. La DGAC ha informado que Chile cuenta con más de 4.000 drones registrados y que esta cantidad continúa aumentando. Este antecedente no permite determinar por sí solo la demanda de servicios de mantenimiento o capacitación, pero evidencia una base relevante de equipos sujetos a operación, inspección, conservación y gestión técnica en distintos contextos de utilización profesional (Madina Díaz, 2024).

En los últimos años, el uso de drones en Chile ha adquirido presencia en actividades industriales, institucionales y de servicios. Entre los sectores que han avanzado en su incorporación se encuentran minería, agricultura, seguridad y construcción, con aplicaciones asociadas a vigilancia, inspección de infraestructura, revisión de torres de alta tensión, labores agrícolas, fumigación, pulverización y geomensura (Diario Financiero, 2024). La diversidad de estas aplicaciones resulta relevante debido a que los requerimientos de disponibilidad, confiabilidad y condición técnica pueden variar según el tipo de operación, el equipo utilizado y las consecuencias asociadas a una eventual falla.

Un ejemplo reciente de esta evolución corresponde a la utilización de RPAS en operaciones mineras de mayor complejidad. En 2026, la División El Teniente de la Corporación Nacional del Cobre de Chile (Codelco) informó la incorporación del dron Elios 3 para inspeccionar y

mapear sectores de difícil acceso en su mina subterránea. El equipo está diseñado para operar en espacios confinados y sin señal GPS, incorpora un sistema LiDAR para el levantamiento tridimensional del entorno y permite recopilar información geomecánica en zonas donde el ingreso de personas implica mayores riesgos. De acuerdo con Codelco, su utilización permite realizar a distancia inspecciones que anteriormente requerían mayores tiempos de exposición del personal, contribuyendo tanto a la seguridad como a la continuidad operacional (Corporación Nacional del Cobre de Chile [Codelco], 2026).



Figuras 2-1: *Utilización de RPAS para inspección de sectores de difícil acceso en División El Teniente.*

Fuente: *Codelco (2026).*

Nota: *El caso ilustra la utilización de RPAS en operaciones profesionales donde se integran navegación en entornos confinados, sensores LiDAR, captura de información técnica y requerimientos de continuidad operacional.*

A nivel internacional, el crecimiento de las aplicaciones de drones también se relaciona con actividades de inspección y monitoreo. Como referencia de mercado, The Insight Partners proyecta que el mercado global asociado a estas aplicaciones aumentará desde USD 15,49 mil millones en 2025 hasta USD 49,74 mil millones en 2034, con una tasa de crecimiento anual compuesta estimada de 13,84% entre 2026 y 2034. Si bien esta proyección no corresponde específicamente al mercado chileno y no se utiliza como estimación de demanda para la propuesta formativa, permite contextualizar la expansión internacional de aplicaciones relacionadas con infraestructura, agricultura, servicios públicos, petróleo, gas y minería (The Insight Partners, 2026).

En el contexto nacional, la formalización del uso profesional de drones puede observarse también mediante los registros publicados por la DGAC. La autoridad mantiene información sobre empresas RPAS con Certificado de Operador Aéreo (AOC) vigente y empresas RPAS con AOC de capacitación. Estos registros permiten evidenciar la existencia de un ecosistema formal de operadores y entidades vinculadas a la instrucción de RPAS en Chile, aunque no representan la totalidad de drones existentes ni constituyen por sí mismos una medición del tamaño del mercado nacional (DGAC, 2026c).

Para las organizaciones que realizan determinadas operaciones profesionales con RPAS también resulta relevante la DAN 119, *Normas para obtención de Certificado de Operador Aéreo (AOC)*, mientras que la DAN 137, Trabajos aéreos, establece disposiciones relacionadas con distintas actividades aéreas especializadas. En conjunto, estas normas permiten observar que el uso profesional de RPAS se integra a mecanismos formales de autorización y certificación establecidos por la autoridad aeronáutica (DGAC, 2025b, 2026a).

Desde la perspectiva técnica, la DAN 151 establece que el piloto a distancia debe determinar, antes de iniciar la operación, si la aeronave se encuentra en condiciones seguras para operar. Este requisito introduce una responsabilidad de verificación de la condición del equipo, aunque no constituye por sí mismo un programa de mantenimiento especializado ni define una figura específica de personal técnico dedicado al mantenimiento de RPAS (DGAC, 2024a). Esta diferencia resulta relevante para analizar posteriormente el grado de formalización existente entre la operación de estos sistemas y su mantenimiento técnico.

La diversidad del sector puede observarse además en los tipos de organizaciones vinculadas al uso profesional de RPAS. Los antecedentes revisados incluyen actores relacionados con minería, energía, ingeniería, construcción, telecomunicaciones, seguridad, educación, medios de comunicación y actividades ambientales. Estas aplicaciones presentan necesidades distintas de disponibilidad operacional, documentación, trazabilidad y soporte técnico, por lo que el mantenimiento no necesariamente responde a un único nivel de profundidad o especialización (DGAC, 2026d).

Junto con la operación profesional existe también una oferta privada de servicios técnicos. Entre los antecedentes revisados se identifican proveedores como Geocom, Prodrone y Drone Service Chile, los cuales ofrecen servicios de reparación, mantenimiento, revisión o soporte técnico para drones. En el caso de Geocom se observan actividades asociadas a inspección física, actualización de firmware, vuelos de prueba, calibración de brújula o magnetómetro y de la unidad de medición inercial (IMU), ciclos de carga y descarga de baterías y reemplazo de componentes como hélices, tren de aterrizaje o motores. Estos antecedentes permiten observar la existencia de necesidades de intervención que comprenden componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos, de navegación y software (Geocom, s. f.; Prodrone, s. f.; Drone Service Chile, s. f.).

Asimismo, se identifican ofertas privadas de capacitación relacionadas específicamente con mantenimiento de drones. La Academia de Drones de Chile dispone de programas que incluyen contenidos asociados a mantenimiento preventivo, diagnóstico de fallas, electrónica, motores, sensores, baterías, software, desarme, reparación, calibración y utilización de herramientas de fabricante (Academia de Drones de Chile, s. f.-a, s. f.-b). De manera complementaria, Geoactivos ofrece un curso de mantenimiento de drones que incorpora contenidos relacionados con componentes del equipo, diagnóstico de fallas frecuentes, revisión y limpieza de motores, hélices, controladores electrónicos de velocidad (ESC), sensores, baterías, calibraciones, actualizaciones de firmware y listas de verificación de mantenimiento preventivo y correctivo (Geoactivos, s. f.). En conjunto, los servicios técnicos y los programas de capacitación descritos representan dos tipos de respuestas existentes en el sector: la prestación de servicios especializados de inspección, diagnóstico, reparación y mantenimiento de equipos, y el desarrollo de formación técnica sobre componentes, procedimientos y detección de fallas. Estas experiencias constituyen referencias concretas para identificar competencias y prácticas que una propuesta universitaria podría integrar o profundizar.

Los antecedentes descritos no constituyen un estudio de demanda ni permiten estimar directamente cuántas personas estarían dispuestas a matricularse en una eventual propuesta de la USM. No obstante, la convergencia entre una base relevante de RPAS registrados, la

existencia de operadores formalizados, la diversidad de aplicaciones profesionales, la presencia de servicios técnicos especializados y la disponibilidad de cursos privados de mantenimiento constituye evidencia indirecta de actividad sectorial y de interés técnico-formativo. Para efectos de esta investigación, estos elementos se utilizan como antecedentes de pertinencia y no como una proyección de matrícula o disposición a pagar.

Tabla 2-1 *:Antecedentes normativos, operacionales, técnicos y formativos del sector RPAS en Chile.*

Elemento	Evidencia	Relevancia para memoria
Normativa operacional RPAS	DAN 151, DAN 91, DAN 119 y DAN 137	Permiten identificar que la operación profesional de RPAS se encuentra regulada en Chile.
Empresas RPAS con AOC vigente	606 registros en listado DGAC consultado	Evidencia la existencia de operadores formales en Chile.
Empresas RPAS con AOC de capacitación	204 registros en listado DGAC consultado	Evidencia oferta formal vinculada a formación operacional RPAS.
Servicios técnicos privados	Prodrone, Drone Service Chile y GeoCom	Muestran que existen servicios de mantenimiento, reparación y soporte técnico de drones en el mercado.
Cursos privados de mantenimiento.	Academia de Drones de Chile y Geoactivos	Evidencia existencia de oferta e interés formativo en mantenimiento de drones

Fuente: *Elaboración propia a partir de DGAC (2026c) y de los antecedentes normativos, técnicos y formativos citados en la sección 2.1.*

Nota: *Los registros y listados DGAC corresponden a los antecedentes consultados durante el desarrollo de la memoria, por lo que pueden modificarse en futuras actualizaciones de la autoridad aeronáutica. La información sectorial y formativa presentada se utiliza con fines exploratorios y no constituye una estimación de demanda.*

A partir de estos antecedentes, se observa que el sector RPAS en Chile dispone de una base regulatoria y operacional identificable, una cantidad relevante de equipos registrados, operadores formalizados, aplicaciones en diferentes sectores productivos e institucionales, servicios técnicos privados y una oferta inicial de capacitación específica en mantenimiento. Al mismo tiempo, estos antecedentes no permiten concluir que exista una estructura homogénea de mantenimiento ni una demanda cuantificada por formación especializada. Por ello, resulta necesario caracterizar con mayor profundidad quién realiza actualmente estas actividades, qué procedimientos y registros se utilizan, qué componentes requieren intervención y qué competencias pueden resultar pertinentes a medida que los equipos y las operaciones adquieren mayor complejidad. Estas interrogantes constituyen posteriormente

insumos para el levantamiento de información, el análisis de brechas y la evaluación de alternativas formativas desarrollados en la memoria.

2.2 Marco normativo chileno relevante para el estudio de RPAS/drones.

En Chile, la autoridad encargada de regular las materias aeronáuticas es la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), organismo que emite Normas Aeronáuticas (DAN) destinadas a regular materias técnicas y operacionales relacionadas con la actividad aeronáutica. Para efectos de esta investigación, el marco normativo revisado puede organizarse en dos grupos. El primero corresponde a normas directamente relacionadas con la operación, autorización, certificación y trabajos aéreos desarrollados mediante RPAS/drones. El segundo comprende normas asociadas al mantenimiento aeronáutico tradicional y a la formación de personal técnico, utilizadas como referencias comparativas para analizar el grado de formalización del mantenimiento de RPAS.

Dentro del primer grupo, una de las principales referencias corresponde a la DAN 151, *Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas*. Esta norma establece requisitos asociados a la operación, registro de la aeronave, credencial del piloto a distancia, condiciones técnicas mínimas y autorización de la operación. Para la presente memoria resulta especialmente relevante que la norma exige verificar que el RPA se encuentre en condiciones seguras antes de su utilización, lo que vincula la operación con la condición técnica del equipo. Sin embargo, la DAN 151 no desarrolla un programa específico de mantenimiento ni establece una estructura de formación técnica especializada para el mantenimiento de RPAS (DGAC, 2024a).

La DAN 91, *Reglas del aire*, establece el marco general asociado a las reglas de vuelo y utilización del espacio aéreo. En el contexto de esta investigación, su función es complementaria respecto de la DAN 151, ya que permite situar la operación de RPAS dentro del sistema aeronáutico general y de las disposiciones que regulan la utilización segura del espacio aéreo (DGAC, 2023b).

Para determinadas actividades profesionales resulta también relevante la DAN 119, *Normas para obtención de Certificado de Operador Aéreo (AOC).* Esta norma establece requisitos asociados al proceso de certificación de operadores aéreos y permite relacionar determinadas operaciones profesionales realizadas con RPAS con estructuras formales de organización, identificación de las aeronaves utilizadas, responsabilidades y procedimientos operacionales (DGAC, 2025b).

De manera complementaria, la DAN 137, *Trabajos aéreos,* regula actividades aéreas especializadas desarrolladas con fines distintos del transporte aéreo. Para la memoria, esta norma permite contextualizar la utilización de RPAS en actividades productivas y de servicios profesionales, reforzando la distinción entre el uso meramente recreativo y operaciones en las que la disponibilidad, confiabilidad y condición técnica del equipo pueden adquirir una mayor relevancia operacional (DGAC, 2026a).

El segundo grupo de normas corresponde al mantenimiento aeronáutico tradicional y se utiliza en esta investigación con un propósito principalmente comparativo. La DAN 43, *Mantenimiento*, establece disposiciones relacionadas con la ejecución y conformidad del mantenimiento aeronáutico, mientras que la DAN 145, *Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)*, establece requisitos aplicables a organizaciones autorizadas para desarrollar actividades de mantenimiento aeronáutico. Ambas normas permiten observar cómo la aviación tradicional estructura materias como responsabilidades técnicas, documentación, registros, calidad y organización del mantenimiento (DGAC, 2024b, 2025a).

Asimismo, la DAN 147, *Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento*, constituye una referencia pertinente desde la perspectiva formativa. La norma relaciona la formación del personal de mantenimiento aeronáutico con aspectos como programas de instrucción, instalaciones, equipamiento y recursos necesarios para el proceso formativo. En esta memoria se utiliza como referencia comparativa para analizar cómo una formación técnica vinculada al mantenimiento puede estructurarse dentro del ámbito aeronáutico, sin asumir que sus requisitos sean directamente aplicables a una eventual formación especializada en mantenimiento de RPAS/drones (DGAC, 2023a).

Tabla 2-2:*Síntesis del marco normativo chileno aplicable al estudio.*

Norma	Materia principal	Relación con la memoria
DAN 151	*Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas*	Norma central para analizar requisitos operacionales, técnicos y documentales directamente relacionados con RPAS en áreas pobladas.
DAN 91	*Reglas del aire*	Entrega el marco operacional aeronáutico general que complementa las disposiciones específicas aplicables a RPAS.
DAN 119	*Normas para obtención de Certificado de Operador Aéreo (AOC)*	Permite relacionar determinadas operaciones profesionales con procesos formales de certificación de operadores.
DAN 137	*Trabajos aéreos*	Permite contextualizar el uso de RPAS en actividades aéreas especializadas, productivas y de servicios.
DAN 43	*Mantenimiento*	Se utiliza como referencia comparativa para analizar principios de mantenimiento, documentación, registros y responsabilidad técnica de la aviación tradicional.
DAN 145	*Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)*	Permite comparar la organización formal del mantenimiento aeronáutico con la situación observada para RPAS/drones.
DAN 147	*Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento*	Se utiliza como referencia comparativa para analizar criterios de estructuración de la formación técnica asociada al mantenimiento aeronáutico.

Fuente: *Elaboración propia a partir de las DAN 43, 91, 119, 137, 145, 147 y 151, individualizadas y citadas en esta sección.*

Nota: *Las DAN 43, DAN 145 y DAN 147 se utilizan como referencias comparativas del mantenimiento aeronáutico tradicional y de la formación de personal técnico. No se interpretan como normas específicas de mantenimiento o formación de mantenedores de RPAS/drones.*

A partir de esta revisión se observa una diferencia en el grado de especificidad normativa entre la operación de RPAS y su mantenimiento técnico. Las DAN 151, DAN 91, DAN 119 y DAN 137 permiten identificar disposiciones explícitas relacionadas con operación, utilización del espacio aéreo, certificación de operadores y trabajos aéreos. En cambio, dentro del conjunto normativo revisado no se identificó una norma equivalente que desarrolle específicamente para RPAS una estructura integral de mantenimiento, organización técnica o formación de personal comparable con la existente en la aviación tradicional.

Esta diferencia no implica que los RPAS operen sin responsabilidades respecto de su condición técnica ni que actualmente no se realicen actividades de mantenimiento. La DAN 151 exige condiciones seguras de operación y, en la práctica, fabricantes y servicios técnicos disponen de procedimientos asociados a inspección, diagnóstico, actualización, reparación y

conservación de estos equipos (DGAC, 2024a; DJI, 2024; DJI Enterprise, s. f.; Geocom, s. f.; Prodrone, s. f.; Drone Service Chile, s. f.). Lo que se identifica para efectos de esta investigación es un menor grado de especificidad y formalización normativa del mantenimiento técnico de RPAS respecto del tratamiento que recibe el mantenimiento dentro de la aviación tradicional.

En consecuencia, el marco normativo constituye uno de los antecedentes que justifican profundizar el análisis desde una perspectiva técnica, documental y formativa. Esta interpretación será posteriormente contrastada con referentes internacionales, antecedentes de servicios técnicos y fabricantes, el levantamiento de información con actores nacionales y el análisis curricular de la formación aeronáutica existente en la Universidad Técnica Federico Santa María.

2.3 Marco normativo de referencia asociado al mantenimiento aeronáutico.

Además de las normas relacionadas directamente con la operación de RPAS/drones, el marco normativo chileno asociado al mantenimiento aeronáutico tradicional constituye una referencia útil para analizar criterios como condición segura, documentación técnica, trazabilidad, organización del mantenimiento y formación de personal. En la presente memoria, estas normas no se interpretan como regulación específica aplicable al mantenimiento de RPAS/drones, sino como referentes comparativos que permiten comprender cómo se estructura formalmente el mantenimiento dentro de la aviación tradicional.

La DAN 43, *Mantenimiento*, establece disposiciones relacionadas con la ejecución y conformidad del mantenimiento aeronáutico y entrega criterios vinculados con la conservación de la condición técnica, las inspecciones, los registros y las responsabilidades asociadas a las intervenciones realizadas sobre aeronaves, motores, hélices y componentes. Para esta investigación, su utilidad radica en comprender el mantenimiento como un proceso que no se limita a corregir una falla una vez producida, sino que considera actividades orientadas a conservar una condición segura y documentada de operación (DGAC, 2024b).

Esta perspectiva resulta pertinente para el análisis de RPAS/drones utilizados en contextos profesionales, debido a que su condición técnica puede relacionarse con la disponibilidad del equipo, la continuidad de una actividad y la seguridad de la operación. Sin embargo, la utilización de la DAN 43 en esta memoria tiene un propósito exclusivamente comparativo y no supone que sus requisitos sean directamente exigibles a los RPAS analizados.

Por otra parte, la DAN 145, *Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)*, establece requisitos para las organizaciones aprobadas por la Dirección General de Aeronáutica Civil para desarrollar actividades de mantenimiento aeronáutico. Desde la perspectiva de esta investigación, la norma permite observar cómo el mantenimiento formal se estructura mediante elementos asociados a organización técnica, instalaciones, procedimientos, registros, personal competente y control de calidad (DGAC, 2025a).

Su incorporación como referencia no implica proponer que el mantenimiento de RPAS/drones deba realizarse necesariamente bajo una organización certificada conforme a DAN 145. Su utilidad consiste en proporcionar un punto de comparación respecto de la forma en que la aviación tradicional distribuye responsabilidades, documenta las intervenciones y organiza técnicamente las actividades de mantenimiento.

Finalmente, la DAN 147, *Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento*, constituye una referencia relevante desde la perspectiva formativa. Esta norma considera aspectos asociados a la organización de la instrucción, programas formativos, instalaciones, equipos, herramientas y recursos necesarios para desarrollar instrucción o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento (DGAC, 2023a).

Para la presente memoria, la DAN 147 permite observar que la formación técnica en mantenimiento aeronáutico requiere una relación coherente entre competencias, contenidos, actividades formativas y recursos para su desarrollo. No obstante, su utilización es nuevamente comparativa: la propuesta académica desarrollada posteriormente no se presenta como un centro aprobado bajo DAN 147 ni se asume que deba cumplir automáticamente las exigencias establecidas por dicha norma.

Tabla 2-3: *Normativa chilena utilizada como referencia comparativa del mantenimiento aeronáutico tradicional.*

Norma	Criterios utilizados como referencia	Alcance dentro de la memoria
DAN 43 – Mantenimiento	Condición segura, inspecciones, registros, documentación y trazabilidad de las intervenciones.	Referencia conceptual del mantenimiento aeronáutico. No se interpreta como un programa específico de mantenimiento RPAS.
DAN 145 – Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)	Organización técnica, instalaciones, procedimientos, personal competente, registros y control de calidad.	Permite comparar la organización formal del mantenimiento aeronáutico. No se asume que un RPAS deba ser mantenido necesariamente por un CMA DAN 145.
DAN 147 – Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento	Estructura formativa, programas de instrucción, instalaciones, equipos y herramientas.	Se utiliza como referencia para analizar una alternativa de formación técnica. No implica que la propuesta deba constituirse como un centro aprobado bajo DAN 147.

Fuente: *Elaboración propia a partir de las DAN 43, 145 y 147, citadas en esta sección.*

Nota: *Las DAN 43, DAN 145 y DAN 147 se utilizan exclusivamente como referencias comparativas del mantenimiento aeronáutico tradicional y de la formación de personal técnico. No se interpretan como normas específicas de mantenimiento de RPAS/drones ni como requisitos directamente aplicables a la propuesta formativa desarrollada en esta memoria.*

A partir de esta revisión se observa que el mantenimiento aeronáutico tradicional dispone de una estructura normativa que aborda aspectos técnicos, documentales, organizacionales y formativos. En contraste, dentro de la normativa específica de RPAS revisada no se identificó una estructura equivalente con el mismo grado de desarrollo para el mantenimiento técnico especializado de estos sistemas (DGAC, 2023a, 2024a, 2024b, 2025a).

Esta diferencia no implica trasladar automáticamente al ámbito RPAS los requisitos establecidos para la aviación tradicional ni sostener que actualmente no exista mantenimiento de drones. Su utilidad consiste en proporcionar un marco comparativo para identificar elementos que pueden resultar relevantes cuando el uso de RPAS adquiere mayor complejidad, tales como competencias técnicas, procedimientos, documentación, trazabilidad, criterios de intervención y recursos para la formación.

En consecuencia, estos referentes contribuyen a estructurar el análisis posterior de brechas y permiten establecer criterios que serán contrastados con los requerimientos técnicos propios

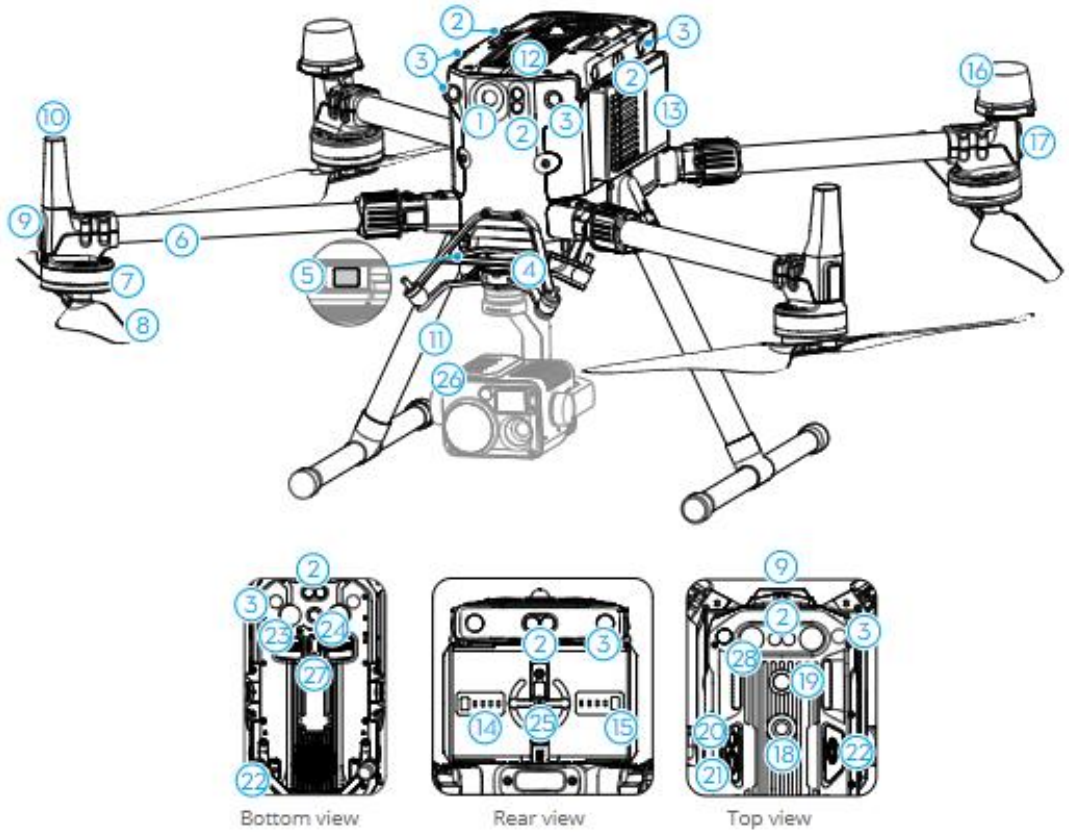
de los RPAS, los antecedentes de fabricantes y servicios técnicos, el levantamiento de información con actores nacionales y la formación aeronáutica disponible en la Universidad Técnica Federico Santa María.

2.4 Mantenimiento RPAS/drones.

El mantenimiento de RPAS/drones puede entenderse, para efectos de esta investigación, como el conjunto de actividades técnicas destinadas a conservar o recuperar las condiciones necesarias para el funcionamiento seguro y confiable del sistema. Su análisis requiere considerar que un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) no comprende únicamente la aeronave, sino también elementos asociados a su control, comunicaciones y misión. Desde esta perspectiva, el RPAS debe analizarse como un sistema integrado compuesto por la aeronave pilotada a distancia, la estación de pilotaje remoto, los enlaces de comunicación y los componentes necesarios para desarrollar la operación prevista (ICAO, 2015, 2017).

Esta configuración implica considerar componentes estructurales, eléctricos, electrónicos y digitales, junto con sistemas de propulsión, baterías, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware y cargas útiles. Por esta razón, el mantenimiento de RPAS puede requerir actividades de inspección física, diagnóstico, calibración, actualización, reemplazo de componentes, verificación funcional y documentación técnica, dependiendo de las características de la aeronave, las instrucciones del fabricante y el alcance de la intervención autorizada (ICAO, 2015; DJI, 2024).

Para visualizar esta integración técnica, la Figura 2-2 presenta como referencia los componentes principales de un RPAS industrial DJI Matrice 350 RTK. Si bien corresponde a un modelo y fabricante específicos, permite observar en una plataforma real la interacción de sistemas estructurales, eléctricos, electrónicos, de navegación, comunicaciones y carga útil que resultan relevantes para el análisis del mantenimiento.



Figuras 2-2: *Componentes principales de un RPAS industrial DJI Matrice 350 RTK.*

Fuente: *Tomado de DJI (2024, p. 36).*

Nota: *1) cámara FPV; 2) sistema de detección infrarrojo; 3) sistema de visión; 4) conector de gimbal DJI v2.0; 5) botón de desprendimiento del gimbal; 6) brazos del marco; 7) motores; 8) hélices; 9) luces LED frontales; 10) antenas de transmisión; 11) tren de aterrizaje; 12) filtro de aire; 13) baterías de vuelo inteligentes; 14) indicadores de nivel de batería; 15) botón de nivel de batería; 16) antenas GNSS; 17) indicadores de estado de la aeronave; 18) baliza superior; 19) botón/indicador de encendido; 20) puerto Assistant; 21) E-Port; 22) puerto de carga útil; 23) luz auxiliar inferior; 24) baliza inferior; 25) seguro de batería; 26) cámara gimbal; 27) compartimento para dongle celular; 28) luz auxiliar superior.*

La figura permite observar que un RPAS industrial integra múltiples componentes cuya condición puede requerir inspección, calibración, actualización, reemplazo o verificación funcional. Esta diversidad técnica justifica abordar el mantenimiento desde una perspectiva multidisciplinaria y constituye posteriormente un antecedente para identificar las competencias que debería cubrir una alternativa formativa especializada (DJI, 2024).

En Chile, la DAN 151, *Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas*, establece que el piloto a distancia debe determinar, antes de iniciar una operación, si el RPA se encuentra en condiciones seguras para realizar el vuelo. Este requisito relaciona directamente la operación con la condición técnica del equipo. Sin embargo, como se indicó anteriormente, la norma no desarrolla un programa específico e integral de mantenimiento RPAS ni una estructura equivalente a la establecida para el mantenimiento aeronáutico tradicional (DGAC, 2024a).

Como referencia internacional, la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) de España señala, en relación con el Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947, que el operador de un sistema de aeronave no tripulada (UAS) debe mantener el sistema en condiciones adecuadas para un funcionamiento seguro y verificar su aptitud antes de realizar la operación prevista. Asimismo, el tratamiento del mantenimiento depende de la categoría operacional y del nivel de riesgo asociado a la actividad, diferenciándose entre categorías abierta, específica y certificada (AESA, 2022).

Desde una perspectiva funcional, las actividades observadas en los antecedentes revisados comprenden tanto acciones preventivas como correctivas. Entre las primeras se encuentran inspecciones periódicas, limpieza, revisión de hélices y motores, control de baterías, verificación de sensores, actualizaciones de software o firmware y calibraciones. Las actividades correctivas, en cambio, se relacionan con la identificación de fallas, daños o comportamientos anormales y con la reparación o sustitución de los componentes afectados. Adicionalmente, el registro de ciclos de batería, alertas, datos de funcionamiento e historial de fallas puede aportar información para anticipar degradaciones y apoyar decisiones de mantenimiento, siempre de acuerdo con los procedimientos y capacidades disponibles para cada plataforma (DJI, 2024; DJI, s. f.).

Los fabricantes y proveedores especializados estructuran sus servicios mediante actividades como inspección de componentes, limpieza, actualización de sistemas, calibraciones, reemplazo de elementos y elaboración de reportes técnicos. DJI y DJI Enterprise, por ejemplo, describen servicios que incluyen inspección detallada, limpieza profunda,

actualización de firmware, calibración y sustitución de piezas de desgaste o componentes principales. Estos antecedentes muestran que el mantenimiento de RPAS/drones no se limita a la reparación de daños físicos visibles, sino que puede incorporar revisión, diagnóstico, actualización, calibración y documentación técnica (DJI, s. f.; DJI Enterprise, s. f.).

En Chile también se observa la existencia de servicios técnicos privados orientados al mantenimiento y reparación de drones y UAS. Geocom declara actividades asociadas a inspección física, actualización de firmware, calibración de brújula o magnetómetro y de la unidad de medición inercial (IMU), vuelos de prueba, gestión de baterías y reemplazo de componentes como hélices, motores o trenes de aterrizaje. Este antecedente permite identificar necesidades técnicas concretas asociadas a componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos, de navegación y software (Geocom, s. f.).

De manera complementaria, Prodrone y Drone Service Chile presentan servicios asociados a reparación, revisión técnica, soporte o mantenimiento de drones en el mercado nacional. Estos antecedentes no permiten caracterizar de manera exhaustiva el mercado chileno de mantenimiento RPAS, pero sí evidencian la existencia de actores privados que atienden necesidades vinculadas al diagnóstico, reparación y continuidad operacional de estos sistemas (Prodrone, s. f.; Drone Service Chile, s. f.).

Tabla 2-4: *Principales áreas técnicas asociadas al mantenimiento de RPAS/drones.*

Área del RPAS	Actividades de mantenimiento asociadas
Estructura y fuselaje	Inspección de grietas, golpes, deformaciones, brazos del marco, tren de aterrizaje, soportes, fijaciones y condición física general.
Propulsión eléctrica	Revisión de motores, hélices, vibraciones, fijaciones, desgaste, ruidos anormales y daños visibles en componentes de propulsión.
Baterías y sistema de energía	Control de ciclos de carga, almacenamiento, temperatura, estado físico, indicadores, seguros de batería, conectores y signos de degradación.
Electrónica y control	Revisión de placas, cableado, conectores, puertos electrónicos, indicadores, sensores internos y sistemas de control.
Navegación y sensores	Verificación o calibración de IMU, brújula/magnetómetro, GNSS, RTK, sistemas de visión, detección infrarroja y sensores de estabilización.
Comunicaciones	Revisión de antenas, enlaces de comando y control, telemetría, transmisión de video, pérdida de señal y continuidad de las comunicaciones.
Software y firmware	Actualizaciones, configuración, compatibilidad, alertas del sistema, registros de aplicación y respaldo de información técnica.
Carga útil	Revisión de cámaras, gimbal, estabilizadores, puertos de carga útil y sensores especializados, como equipos térmicos, multiespectrales o LiDAR.
Seguridad, señalización y estado operacional	Revisión de luces LED, indicadores de estado, balizas, luces auxiliares y alertas visibles del sistema.
Documentación técnica	Registro de inspecciones, fallas, reparaciones, ciclos de batería, cambios de componentes, actualizaciones de software/firmware y pruebas o reportes técnicos.

Fuente: *Elaboración propia a partir de los antecedentes técnicos, de fabricantes y de servicios especializados citados en la sección 2.4.*

Nota: *Las áreas indicadas corresponden a una síntesis técnica general elaborada a partir de normativa, documentación de fabricante y antecedentes de servicios técnicos. La Figura 2-2 se utiliza únicamente como ejemplo de un RPAS industrial y no representa la totalidad de configuraciones, fabricantes o tipos de RPAS existentes. Las actividades aplicables y los límites de intervención pueden variar según la plataforma, fabricante, categoría operacional, carga útil y procedimientos técnicos correspondientes.*

A partir de estos antecedentes, el mantenimiento de RPAS/drones puede caracterizarse como un ámbito técnico multidisciplinario. No se limita al reemplazo de componentes dañados, sino que puede comprender inspección preventiva, diagnóstico, calibración, actualización de software y firmware, control de baterías, revisión de sistemas de navegación y comunicaciones, verificación de sensores y documentación de las intervenciones realizadas (AESA, 2022; DJI, 2024; DJI, s. f.; DJI Enterprise, s. f.).

Esta caracterización constituye un insumo directo para el análisis formativo desarrollado posteriormente. Las áreas identificadas permiten establecer las competencias técnicas que

deben contrastarse con la formación aeronáutica existente en la USM y, posteriormente, determinar cuáles se encuentran cubiertas, cuáles requieren adaptación y cuáles justifican contenidos específicos dentro de una alternativa especializada en mantenimiento de RPAS/drones.

2.4.1 Seguridad operacional, enlaces de comunicación e interferencias en RPAS/drones

El mantenimiento de RPAS/drones no debe analizarse únicamente desde la condición física o mecánica de la aeronave. Un sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS) integra la aeronave, la estación de pilotaje remoto, los enlaces de comunicación, sensores, sistemas de navegación, software, firmware y otros componentes asociados a la operación. En consecuencia, la seguridad operacional depende tanto del estado físico del equipo como de la confiabilidad de sus sistemas eléctricos, electrónicos, digitales, de navegación y comunicación (ICAO, 2015, 2017).

Uno de los elementos relevantes dentro de esta arquitectura corresponde al enlace de mando y control (C2, *Command and Control Link*), mediante el cual se intercambia información entre la aeronave pilotada a distancia y la estación de pilotaje remoto para gestionar el vuelo. Una pérdida, degradación o interrupción de este enlace puede afectar la capacidad de control de la aeronave, por lo que su funcionamiento y las condiciones asociadas a la comunicación constituyen aspectos relevantes para la operación segura del sistema (ICAO, 2017).

Los riesgos técnicos asociados a un RPAS no se limitan, por tanto, a daños visibles en hélices, motores, estructura o baterías. También pueden relacionarse con pérdida o degradación de señal, fallas de sensores, errores de posicionamiento o navegación, configuraciones incorrectas, incompatibilidades de software, firmware desactualizado o interferencias que afecten el comportamiento esperado del sistema. Estos elementos reflejan la dependencia de los RPAS respecto de sistemas digitales y comunicaciones inalámbricas y justifican incorporar criterios de verificación funcional, configuración y diagnóstico dentro del análisis del mantenimiento (ICAO, 2017; DJI, 2024).

Desde la perspectiva de la seguridad operacional, la seguridad de la información adquiere relevancia cuando una alteración, falla o vulnerabilidad de los sistemas digitales puede producir consecuencias sobre la operación. La European Union Aviation Safety Agency (EASA) aborda la gestión de riesgos de seguridad de la información cuando estos presentan un potencial impacto sobre la seguridad de la aviación. Para efectos de esta memoria, este enfoque permite reconocer la relación existente entre integridad de la información, configuración de sistemas, control de accesos y continuidad operacional, sin interpretar dichas disposiciones como requisitos específicos de mantenimiento RPAS (EASA, 2025).

De manera complementaria, la Cybersecurity and Infrastructure Security Agency (CISA) reconoce que los sistemas de aeronaves no tripuladas pueden presentar riesgos físicos y cibernéticos, especialmente en contextos asociados a infraestructura crítica, espacios sensibles o protección de información. Este antecedente no implica que la presente investigación desarrolle una especialización en ciberseguridad, pero permite reconocer que la confiabilidad técnica de un RPAS también puede depender de la protección de sus sistemas digitales, comunicaciones y datos (CISA, s. f.).

Tabla 2-5: *Aspectos técnicos vinculados a seguridad operacional en RPAS/drones.*

Aspecto técnico	Riesgo o implicancia operacional	Competencia formativa asociada
Enlace C2	Pérdida, degradación o interrupción del control y comunicación entre la aeronave y la estación de pilotaje remoto.	Comprender la función del enlace C2, sus condiciones básicas de funcionamiento y criterios de verificación.
Navegación satelital	Errores de posicionamiento, pérdida de referencia GNSS o comportamiento anómalo del sistema.	Identificar la función de GNSS, RTK, brújula/magnetómetro e IMU y su relación con una operación segura.
Sensores y sistemas de visión	Fallas de estabilización, detección, orientación o asistencia al vuelo.	Reconocer sensores relevantes, necesidades de calibración y señales de funcionamiento anormal.
Software y firmware	Incompatibilidades, errores de configuración, alertas no atendidas o pérdida de funcionalidades.	Aplicar criterios básicos de revisión de versiones, configuración, actualización y respaldo de información técnica.
Comunicaciones inalámbricas	Interferencias, pérdida de telemetría, degradación de transmisión de video o interrupción del enlace.	Evaluar condiciones básicas de comunicación, antenas, telemetría y respuesta ante pérdida o degradación de señal.
Seguridad de la información con impacto operacional	Alteraciones, configuraciones inadecuadas, accesos no autorizados o pérdida de integridad de información que puedan afectar la operación.	Comprender la relación entre configuración segura, protección de información, control de accesos y seguridad operacional.

Fuente: *Elaboración propia a partir de los referentes de seguridad operacional y sistemas digitales citados en la sección 2.4.1.*

Nota: *La tabla no propone una especialización en ciberseguridad ni aborda técnicas de interferencia deliberada. Su propósito es identificar aspectos técnicos y digitales cuya condición puede incidir en la seguridad operacional y que, por tanto, resultan pertinentes dentro de una formación asociada al mantenimiento de RPAS/drones.*

Por lo anterior, una alternativa formativa en mantenimiento de RPAS/drones debería incorporar, al menos a nivel introductorio, contenidos relacionados con confiabilidad de enlaces, pérdida o degradación de señal, navegación satelital, sensores, actualización y configuración de software o firmware, verificación funcional y respuesta ante comportamientos anormales del sistema. El propósito no es transformar la propuesta en una formación especializada en ciberseguridad o telecomunicaciones, sino reconocer que el mantenimiento técnico de RPAS requiere considerar, junto con la inspección física, elementos eléctricos, electrónicos, digitales, de navegación, comunicación y seguridad operacional.

2.5 Formación técnica y competencias requeridas para mantenimiento de RPAS/drones.

La incorporación del mantenimiento de RPAS/drones dentro de una alternativa formativa especializada requiere identificar previamente qué conocimientos y competencias resultan pertinentes para participar en actividades de inspección, diagnóstico, documentación y mantenimiento de estos sistemas dentro de un alcance técnico definido. Estas competencias deben considerar no solo los componentes físicos del equipo, sino también aspectos eléctricos, electrónicos, digitales, normativos, documentales y de seguridad operacional identificados en las secciones anteriores.

En este contexto, la carrera Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico (TUMA) de la Universidad Técnica Federico Santa María (USM) constituye una referencia curricular institucional pertinente para el análisis. Su formación contempla áreas relacionadas con mantenimiento preventivo, correctivo y recuperativo de aeronaves, motores y sistemas, además de contenidos vinculados con normativa, sistemas eléctricos y electrónicos, estructuras, sistemas digitales, microprocesadores, aviónica, gestión del mantenimiento y seguridad operacional (USM, s. f.-b).

El plan de estudios de TUMA incluye asignaturas relacionadas con varias de las áreas técnicas previamente identificadas para los RPAS/drones, entre ellas Gestión del Mantenimiento Aeronáutico, Sistemas Eléctricos, Estructuras y Sistemas, Sistemas Digitales, Seguridad Operacional y Sistema de Gestión de Seguridad Operacional (SMS), Sistemas Electrónicos, Microprocesadores y Aviónica. Estas áreas permiten identificar capacidades formativas que pueden ser aprovechadas o adaptadas al contexto de los sistemas no tripulados (USM, s. f.-b).

Sin embargo, la existencia de estas capacidades no implica que las particularidades del mantenimiento de RPAS/drones se encuentren cubiertas de manera específica por la formación actual. Los sistemas no tripulados incorporan configuraciones y componentes que pueden requerir una adaptación de conocimientos existentes, entre ellos propulsión eléctrica aplicada a drones, baterías inteligentes, controladores de vuelo, sensores de navegación,

enlaces inalámbricos, telemetría, software, firmware, cargas útiles especializadas y procedimientos particulares de fabricante (ICAO, 2015, 2017; DJI, 2024).

Por esta razón, TUMA se utiliza como referencia curricular para contrastar competencias existentes con los requerimientos identificados para RPAS, sin asumir que constituya el único perfil de ingreso posible para una futura alternativa formativa. La propuesta podrá considerar también técnicos o profesionales provenientes de áreas afines que posean conocimientos compatibles con los contenidos y nivel de especialización definidos posteriormente.

Desde la perspectiva de la formación aeronáutica tradicional, la DAN 147, *Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento*, constituye una referencia comparativa. La norma relaciona la formación del personal de mantenimiento con elementos como programas de instrucción, competencias, instalaciones, equipos y herramientas. En esta investigación se utiliza únicamente como antecedente para observar cómo se estructura formalmente la formación técnica aeronáutica, sin interpretar sus requisitos como directamente aplicables a la propuesta especializada en RPAS/drones (DGAC, 2023a).

A nivel internacional, la European Union Aviation Safety Agency (EASA), Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea, incorpora dentro de su marco para sistemas de aeronaves no tripuladas funciones, responsabilidades y requisitos de competencia que varían de acuerdo con la categoría operacional, el nivel de riesgo y las características de la operación. Este enfoque constituye un antecedente comparativo relevante para analizar la necesidad de diferenciar adecuadamente las funciones asociadas a operación, mantenimiento y gestión técnica a medida que aumenta la complejidad de los sistemas y de las actividades desarrolladas (EASA, 2024).

A partir de la revisión normativa, técnica y curricular desarrollada hasta este punto, las competencias asociadas al mantenimiento de RPAS/drones pueden organizarse preliminarmente en cinco dimensiones: técnica, operacional, normativa, documental y de seguridad operacional. Esta clasificación constituye una estructura inicial de análisis y será

contrastada posteriormente con los resultados del levantamiento de información y el análisis de brechas.

Tabla 2-6: *Competencias preliminares para el mantenimiento técnico de RPAS/drones.*

Dimensión	Competencias preliminares requeridas	Relación con la formación existente
Técnica	Inspeccionar y reconocer condiciones relevantes en estructura, motores, hélices, baterías, sensores, sistemas eléctricos y electrónicos, cableado, software, firmware y cargas útiles; aplicar criterios básicos de diagnóstico y verificación funcional.	Relación con sistemas eléctricos, electrónicos y digitales, microprocesadores, aviónica, estructuras y mantenimiento de sistemas.
Operacional	Comprender cómo las condiciones de utilización, ambiente, carga, autonomía y criticidad de la operación pueden influir en desgaste, confiabilidad y necesidades de mantenimiento del RPAS.	Relación con seguridad operacional, Sistema de Gestión de Seguridad Operacional, gestión del mantenimiento y planificación.
Normativa	Interpretar los principales requisitos asociados a operación RPAS, certificación de operadores, trabajos aéreos, condición segura y límites de intervención, diferenciando la regulación específica de RPAS de las referencias del mantenimiento aeronáutico tradicional.	Relación con normativa aeronáutica y con las DAN utilizadas como referencia dentro de la investigación.
Documental	Registrar inspecciones, fallas, intervenciones, cambios de componentes, ciclos de baterías, actualizaciones de software o firmware, calibraciones y pruebas funcionales, manteniendo trazabilidad de la condición técnica del equipo.	Relación con gestión documental, registros de mantenimiento, trazabilidad, informes técnicos y control de la condición del sistema.
Seguridad operacional	Aplicar criterios de prevención y seguridad en manipulación de baterías, pruebas de motores, trabajo con sistemas eléctricos y electrónicos, operación en tierra, enlaces de comunicación y respuesta ante comportamientos anormales.	Relación con SMS, seguridad operacional, procedimientos técnicos, confiabilidad de sistemas y gestión de riesgos.

Fuente: *Elaboración propia a partir de los antecedentes técnicos y curriculares analizados en las secciones 2.2 a 2.5.*

Nota: *Las competencias corresponden a una clasificación preliminar elaborada durante el Estado del Arte. Su pertinencia y nivel de profundidad serán contrastados posteriormente mediante el levantamiento de información y el análisis de brechas. La tabla no establece atribuciones profesionales ni habilitaciones para intervenir cualquier tipo de RPAS.*

La comparación preliminar permite observar que la formación aeronáutica existente en la USM presenta capacidades compatibles con varias de las dimensiones identificadas, especialmente en mantenimiento, sistemas eléctricos y electrónicos, aviónica, documentación y seguridad operacional. Las diferencias potenciales se concentran

principalmente en la aplicación específica de estos conocimientos a sistemas no tripulados, incluyendo propulsión eléctrica, baterías inteligentes, sensores, enlaces inalámbricos, software, firmware, cargas útiles y procedimientos propios de las plataformas RPAS (USM, s. f.-b; ICAO, 2015, 2017; DJI, 2024).

En consecuencia, el análisis identifica una oportunidad institucional para aprovechar las capacidades académicas existentes en la USM y evaluar su articulación con una formación específica en mantenimiento de RPAS/drones, sin presuponer la creación de una nueva carrera ni la modificación de planes de estudio vigentes. La modalidad, extensión y público objetivo de la alternativa formativa se determinan posteriormente a partir de los resultados del levantamiento de información, el análisis de brechas y la comparación de distintas opciones académicas.

2.6 Referentes internacionales para el mantenimiento de UAS/RPAS

Como complemento del análisis normativo chileno, se revisan referentes internacionales que incorporan criterios relacionados con operación, mantenimiento, condición segura, competencias del personal, documentación y trazabilidad de sistemas de aeronaves no tripuladas (UAS) y RPAS. Estos antecedentes se utilizan exclusivamente con fines comparativos y no sustituyen la normativa aeronáutica chilena ni se interpretan como requisitos directamente aplicables al contexto nacional.

Uno de los principales referentes corresponde a la European Union Aviation Safety Agency (EASA), Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea, cuyo marco regulatorio clasifica las operaciones con UAS en las categorías abierta, específica y certificada de acuerdo con las características y nivel de riesgo de la operación. La categoría abierta comprende operaciones de menor riesgo y sujetas a condiciones previamente establecidas; la categoría específica considera operaciones que requieren una evaluación y mitigación más detallada del riesgo; mientras que la categoría certificada comprende operaciones de mayor criticidad que pueden requerir certificación del UAS, del operador y, cuando corresponda, licenciamiento del piloto remoto (EASA, 2024).

Para efectos de esta investigación, esta clasificación permite incorporar un principio de proporcionalidad: los requerimientos técnicos y organizacionales asociados a una operación no necesariamente deben ser iguales para todos los RPAS, sino que pueden variar según su complejidad, condiciones de utilización y nivel de riesgo. Este criterio resulta relevante al analizar el mantenimiento, dado que un equipo empleado en una operación simple y de baja criticidad puede requerir condiciones distintas de aquel utilizado en inspección industrial, infraestructura, minería, energía, emergencias u otras actividades de mayor exigencia operacional (EASA, 2024).

Un referente especialmente relevante corresponde a la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) de España, que desarrolla orientaciones específicas para el mantenimiento de UAS dentro del marco europeo. AESA señala que corresponde al operador mantener el sistema en condiciones adecuadas para un funcionamiento seguro y que las actividades de mantenimiento dependen de la categoría operacional en la que se utilice el UAS (AESA, 2022).

En categoría abierta, AESA indica que el mantenimiento puede ser realizado por el operador mediante procedimientos basados en la documentación del fabricante. Para operaciones en categoría específica, en cambio, establece la utilización de instrucciones de mantenimiento y de personal debidamente formado y cualificado. Asimismo, contempla la definición de competencias mínimas y responsabilidades del personal, el mantenimiento de registros de formación y cualificaciones y la conservación de antecedentes sobre las actividades de mantenimiento efectuadas. Dependiendo del nivel de riesgo de la operación, pueden incorporarse además programas de mantenimiento, documentación organizacional y mayores exigencias para el personal responsable (AESA, 2022).

Este enfoque resulta particularmente pertinente para la memoria porque vincula el mantenimiento no solo con la intervención física del equipo, sino también con procedimientos documentados, competencias del personal, responsabilidades y trazabilidad. De esta manera, proporciona criterios comparativos que posteriormente pueden ser

contrastados con la situación nacional y con las brechas técnicas, documentales y formativas identificadas durante la investigación (AESA, 2022).

Como referencia estadounidense se considera la Federal Aviation Administration (FAA), Administración Federal de Aviación de Estados Unidos, y el marco establecido en el Título 14 del Código de Regulaciones Federales, Parte 107 (*Small Unmanned Aircraft Systems*). Dentro de este marco, la operación de pequeños UAS se encuentra condicionada a que el sistema se encuentre en condiciones seguras para operar. La guía de estudio para pilotos remotos incorpora además procedimientos de inspección previa al vuelo y señala la necesidad de corregir las irregularidades identificadas antes de realizar la operación (FAA, 2016; Electronic Code of Federal Regulations [eCFR], 2026).

El referente estadounidense resulta útil para reforzar la relación existente entre condición técnica e inicio seguro de una operación. Sin embargo, para efectos de esta memoria no se interpreta la Parte 107 como un programa integral de mantenimiento comparable con las estructuras del mantenimiento aeronáutico tradicional, sino como un antecedente que incorpora explícitamente la verificación técnica y la inspección previa dentro de las responsabilidades asociadas a la operación segura (FAA, 2016; eCFR, 2026).

Finalmente, la International Civil Aviation Organization (ICAO), Organización de Aviación Civil Internacional (OACI), aborda los RPAS desde una perspectiva sistémica en el *Manual on Remotely Piloted Aircraft Systems (RPAS),* Doc. 10019. El documento considera aspectos relacionados con aeronavegabilidad, operaciones, licencias, gestión del tránsito aéreo, enlaces de comando y control, seguridad operacional y otros elementos necesarios para la integración de RPAS en el sistema aeronáutico (ICAO, 2015).

La perspectiva de ICAO resulta relevante porque permite analizar el RPAS como un sistema compuesto por elementos interdependientes y no únicamente como una aeronave aislada. Esta aproximación respalda la consideración de documentación técnica, sistemas de comunicación, condición de la aeronave, responsabilidades operacionales y seguridad como dimensiones relacionadas dentro del análisis del mantenimiento (ICAO, 2015).

En conjunto, los referentes revisados muestran que el tratamiento del mantenimiento y de la condición técnica de UAS/RPAS puede variar según el marco regulatorio, la categoría de operación y el nivel de riesgo considerado. Como criterio comparativo para esta investigación, se observa que operaciones de mayor complejidad pueden requerir una mayor formalización mediante instrucciones de mantenimiento, registros técnicos, personal competente, responsabilidades definidas y mecanismos de trazabilidad. Este criterio no se traslada automáticamente al marco chileno, sino que se utiliza posteriormente para contrastar la situación nacional y apoyar la identificación de brechas (AESA, 2022; EASA, 2024).

Tabla 2-7: *Referentes internacionales para el análisis del mantenimiento de UAS/RPAS.*

Referente	Enfoque considerado	Aporte a la investigación
EASA – Unión Europea	Clasificación de operaciones UAS en categorías abierta, específica y certificada bajo un enfoque proporcional al riesgo.	Permite relacionar complejidad y riesgo operacional con distintos niveles de exigencia técnica y organizacional.
AESA – España	Orientaciones específicas sobre mantenimiento UAS, instrucciones, personal formado y cualificado, competencias y registros.	Entrega criterios comparativos concretos sobre mantenimiento documentado, trazabilidad y competencias del personal.
FAA – Estados Unidos	Condición segura de operación, mantenimiento e inspección previa bajo el marco de 14 CFR Part 107.	Refuerza la relación entre verificación de la condición técnica del sistema y operación segura.
OACI / ICAO	Visión sistémica del RPAS e integración dentro del sistema aeronáutico.	Permite analizar el RPAS como un sistema que integra aeronave, comunicaciones, operación, documentación y seguridad.

Fuente: *Elaboración propia a partir de los referentes de EASA, AESA, FAA y OACI citados en la sección 2.6.*

Nota*: Los referentes internacionales se utilizan exclusivamente con fines comparativos y no reemplazan la normativa chilena aplicable. Su aporte consiste en identificar criterios técnicos, documentales, formativos y operacionales que posteriormente son contrastados con los antecedentes nacionales y utilizados como insumo para el análisis de brechas.*

La comparación internacional permite observar que el mantenimiento de UAS/RPAS adquiere distintas exigencias según las características y criticidad de la operación. Para la presente investigación, los elementos de mayor interés corresponden a la relación entre condición técnica y operación segura, utilización de instrucciones de mantenimiento, documentación y registros, competencias del personal, asignación de responsabilidades y trazabilidad de las intervenciones (AESA, 2022; EASA, 2024; FAA, 2016; eCFR, 2026).

Estos criterios complementan el análisis normativo chileno y permiten establecer dimensiones que serán contrastadas posteriormente con los resultados del levantamiento nacional. De esta forma, la eventual propuesta formativa no deriva exclusivamente de referentes extranjeros ni de la estructura actualmente existente en TUMA, sino de la convergencia entre requerimientos técnicos de los RPAS, marco normativo, referentes internacionales, prácticas observadas en el sector y capacidades formativas disponibles en la USM.

2.7 Síntesis metodológica derivada del Estado del Arte.

Los antecedentes revisados en el Estado del Arte permiten estructurar el desarrollo de la investigación a partir de una relación entre cuatro ámbitos principales: marco normativo, requerimientos técnicos del mantenimiento de RPAS/drones, formación disponible y evidencia proveniente de actores vinculados al sector. Esta integración permite evitar que la propuesta académica se fundamente exclusivamente en una única fuente normativa, tecnológica o curricular.

En primer lugar, la revisión del marco chileno permite distinguir entre las DAN 91, 119, 137 y 151, asociadas principalmente a la dimensión operacional, y las DAN 43, 145 y 147, utilizadas como referencias comparativas del mantenimiento aeronáutico tradicional. Esta distinción, desarrollada en las secciones 2.2 y 2.3, permite analizar el grado de formalización existente sin trasladar automáticamente al ámbito RPAS requisitos establecidos para otras categorías de aeronaves u organizaciones.

De manera complementaria, los referentes internacionales permiten incorporar criterios asociados a condición segura, proporcionalidad según el riesgo de la operación, instrucciones de mantenimiento, competencias del personal, documentación y trazabilidad. Estos elementos no se consideran obligaciones directamente aplicables al contexto chileno, sino parámetros comparativos que permiten enriquecer el posterior análisis de brechas (AESA, 2022; EASA, 2024; FAA, 2016; eCFR, 2026; ICAO, 2015).

La caracterización técnica desarrollada permite organizar el mantenimiento de RPAS/drones en dimensiones vinculadas con estructura, propulsión eléctrica, baterías, electrónica, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware, cargas útiles, documentación y seguridad operacional. Estas dimensiones proporcionan una primera aproximación a las competencias que posteriormente deben ser contrastadas con las prácticas observadas en el sector y con las capacidades formativas disponibles en la Universidad Técnica Federico Santa María (ICAO, 2015, 2017; DJI, 2024; AESA, 2022).

El análisis curricular utiliza la carrera Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico (TUMA) como una referencia institucional relevante dentro de la USM, debido a la existencia de contenidos relacionados con mantenimiento, sistemas eléctricos y electrónicos, aviónica, sistemas digitales, gestión y seguridad operacional (USM, s. f.-b). Sin embargo, TUMA no constituye el único público potencial de una alternativa formativa ni determina por sí sola su diseño. La investigación considera además la posible participación de personas provenientes de áreas técnicas o profesionales afines, siempre que cuenten con conocimientos compatibles con el nivel y alcance de la formación propuesta.

A partir de estos antecedentes, el desarrollo de la memoria incorpora un levantamiento exploratorio de información mediante entrevistas, contactos con actores nacionales, documentación institucional y solicitudes efectuadas conforme a la Ley N.º 20.285 sobre Acceso a la Información Pública. Su función es contrastar los antecedentes normativos y técnicos con prácticas observadas en organismos, usuarios, servicios especializados y entidades de capacitación, sin pretender representar estadísticamente la totalidad del sector RPAS chileno (Ley N.º 20.285, 2008).

La integración de estas fuentes permite desarrollar posteriormente un análisis de brechas en dimensiones normativa, técnica, documental y formativa. Para efectos de esta investigación, las brechas no se interpretan como ausencia absoluta de mantenimiento, capacitación o responsabilidades técnicas, sino como diferencias entre las necesidades identificadas para un mantenimiento más sistemático y especializado y las condiciones observadas en los antecedentes revisados.

Sobre esta base se evalúan distintas alternativas de incorporación formativa, considerando su pertinencia respecto de las brechas identificadas, el público objetivo, el nivel de profundidad requerido y las capacidades académicas disponibles. La modalidad no se establece previamente al diagnóstico, sino que constituye un resultado del proceso de análisis y comparación desarrollado en el capítulo siguiente.

Finalmente, una vez seleccionada y diseñada la alternativa formativa, su puesta en marcha se somete a una evaluación preliminar mediante un modelo técnico-económico de apoyo a la decisión implementado en Microsoft Excel. Esta evaluación relaciona el diseño curricular con requerimientos de horas formativas, capacidad práctica, recursos docentes, infraestructura, equipamiento, costos, matrícula y resultados económico-financieros. El modelo se utiliza para comparar escenarios de implementación bajo supuestos explícitos y no como herramienta de pronóstico de demanda.

CAPÍTULO 3
DESARROLLO

3 Desarrollo

El presente capítulo desarrolla el análisis aplicado de la investigación a partir de los antecedentes normativos, técnicos, sectoriales y formativos establecidos previamente. Su propósito es contrastar dichos antecedentes con información obtenida desde actores vinculados al sector RPAS en Chile, identificar y estructurar las principales brechas asociadas al mantenimiento de estos sistemas y, posteriormente, evaluar alternativas para su abordaje mediante una propuesta formativa compatible con el contexto académico de la Universidad Técnica Federico Santa María.

En primer lugar, se desarrolla un diagnóstico normativo aplicado que permite distinguir los aspectos regulados directamente para la operación de RPAS/drones en Chile de aquellos relacionados con mantenimiento, organización técnica y formación de personal que se utilizan únicamente como referencias comparativas provenientes de la aviación tradicional. Este análisis permite establecer el marco regulatorio dentro del cual se interpreta posteriormente la problemática, evitando atribuir a los RPAS requisitos normativos que no les son directamente aplicables.

Posteriormente, se identifican los actores considerados en el levantamiento de información y se presentan los antecedentes obtenidos mediante entrevistas semiestructuradas, contactos con organizaciones y solicitudes realizadas conforme a la Ley N.º 20.285 sobre Acceso a la Información Pública. El levantamiento tiene un carácter exploratorio y busca complementar la revisión documental mediante antecedentes sobre utilización de RPAS, prácticas de mantenimiento, responsables de las intervenciones, documentación y registros, capacitación y necesidades técnicas observadas. Los resultados no se interpretan como una representación estadística del mercado nacional, sino como evidencia destinada a contrastar y complementar las distintas fuentes consideradas en la investigación.

A partir de la integración de la evidencia normativa, técnica, sectorial e institucional, se desarrolla un análisis de brechas en las dimensiones normativa, técnica, documental y formativa. Estas brechas se contrastan además con capacidades formativas existentes en la

USM, utilizando la carrera Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico (TUMA) como una referencia curricular institucional y considerando también la posible participación de perfiles técnicos o profesionales afines. El análisis no se limita a describir diferencias, sino que incorpora una estructuración de sus causas y una priorización de aquellas que presentan mayor relevancia para el problema investigado, de manera de fundamentar posteriormente los contenidos y características de la alternativa formativa.

Sobre la base de las brechas identificadas y priorizadas, se evalúan distintas alternativas de incorporación formativa, considerando criterios como público objetivo, profundidad técnica, cobertura de competencias, articulación con capacidades académicas existentes y requerimientos de implementación. La modalidad seleccionada surge, por tanto, del análisis desarrollado y no constituye una decisión establecida previamente. A partir de dicha selección se diseña la propuesta académica, incluyendo sus objetivos, perfil de ingreso y egreso, resultados de aprendizaje, estructura modular, contenidos, metodología, evaluación y recursos requeridos.

Finalmente, la propuesta seleccionada se somete a una evaluación preliminar de puesta en marcha mediante un modelo técnico-económico de apoyo a la decisión implementado en Microsoft Excel, complementado mediante Solver para la evaluación de alternativas sujetas a restricciones. El modelo relaciona variables curriculares y operacionales —como duración, horas formativas, capacidad, disponibilidad docente, infraestructura y equipamiento— con variables económicas tales como inversión, costos fijos y variables, matrícula, precio y resultados financieros. Los valores de matrícula, precio y número de versiones se utilizan como escenarios de evaluación y no como pronósticos de demanda. De esta manera, el capítulo integra la pertinencia formativa con las condiciones técnicas, operacionales y económico-financieras requeridas para analizar preliminarmente la factibilidad de implementación de la propuesta.

3.1 Diagnóstico normativo aplicado

El diagnóstico normativo aplicado tiene como propósito determinar cómo el marco regulatorio revisado se relaciona con el problema investigado, distinguiendo entre

disposiciones directamente vinculadas con la operación de RPAS/drones y normas del mantenimiento aeronáutico tradicional utilizadas como referencias comparativas. Esta distinción permite analizar el grado de formalización existente en materias operacionales, técnicas y formativas sin atribuir a los RPAS requisitos que no les son directamente aplicables.

Para este análisis se consideran, por una parte, la DAN 151, *Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas*; la DAN 91, *Reglas del aire*; la DAN 119, *Normas para obtención de Certificado de Operador Aéreo (AOC)*; y la DAN 137, *Trabajos aéreos.* Estas normas permiten caracterizar distintos aspectos relacionados con operación, utilización del espacio aéreo, certificación de operadores y realización de actividades aéreas especializadas.

En conjunto, estos antecedentes muestran que el uso profesional de RPAS en Chile se encuentra incorporado dentro de un marco formal que contempla requisitos de operación, autorización, registro y, según corresponda, certificación del operador. La existencia de empresas RPAS formalizadas por la autoridad aeronáutica complementa este diagnóstico y evidencia que estos sistemas participan en actividades reguladas y de carácter profesional, sin que ello permita inferir por sí solo la existencia de una demanda específica por servicios o formación de mantenimiento (DGAC, 2026d).

Por otra parte, la DAN 43, *Mantenimiento*; la DAN 145, *Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)*; y la DAN 147, *Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento*, permiten observar cómo el mantenimiento de la aviación tradicional dispone de criterios explícitos relacionados con condición técnica, registros, organización del mantenimiento y formación del personal. Para efectos de esta investigación, estas normas se utilizan exclusivamente como referencias comparativas y no como disposiciones específicas aplicables al mantenimiento de RPAS/drones (DGAC, 2023a, 2024b, 2025a).

La comparación entre ambos grupos permite identificar una diferencia relevante. En las normas revisadas específicamente vinculadas con RPAS, la dimensión operacional presenta un mayor grado de desarrollo explícito en materias como autorización, reglas de operación, certificación y trabajos aéreos. En cambio, dentro de dichas normas no se identificó una estructura equivalente a la utilizada en la aviación tradicional para organizar de manera integral el mantenimiento, la trazabilidad de las intervenciones y la formación especializada del personal técnico.

Este resultado no debe interpretarse como ausencia de responsabilidades respecto de la condición técnica de los RPAS. La DAN 151 exige verificar que el equipo se encuentre en condiciones seguras para operar y establece determinadas condiciones técnicas para su utilización. El hallazgo corresponde, más específicamente, a un menor grado de especificidad y formalización del mantenimiento técnico de RPAS dentro del marco normativo directamente relacionado con estos sistemas, en comparación con la estructura existente para el mantenimiento aeronáutico tradicional (DGAC, 2024a).

Esta diferencia constituye el primer componente del problema que posteriormente se contrasta con evidencia práctica. Por sí sola, la revisión normativa no permite concluir que exista una brecha formativa ni determinar su magnitud; para ello es necesario analizar cómo los actores del sector realizan el mantenimiento, quién asume estas funciones, qué procedimientos y registros utilizan y qué capacidades técnicas consideran necesarias.

***Tabla 3-1**:Aplicación del marco normativo chileno al diagnóstico de la investigación.*

Norma	Ámbito principal	Aporte al diagnóstico	Implicancia para la investigación
DAN 151	Operaciones de RPAS sobre áreas pobladas.	Establece requisitos operacionales, documentales y determinadas condiciones técnicas para la operación de RPAS.	Permite analizar la relación entre operación segura y conservación de la condición técnica del equipo.
DAN 91	Reglas del aire.	Proporciona el marco general para la utilización del espacio aéreo y las reglas aplicables a las operaciones aéreas.	Sitúa la operación de RPAS dentro del sistema aeronáutico general.
DAN 119	Obtención del Certificado de Operador Aéreo (AOC).	Formaliza requisitos para la certificación de operadores aéreos.	Permite analizar el nivel de formalización exigido a organizaciones que desarrollan determinadas operaciones profesionales.
DAN 137	Trabajos aéreos.	Regula actividades aéreas especializadas dentro de las cuales pueden emplearse RPAS según corresponda.	Permite contextualizar el uso profesional de RPAS y la importancia que adquiere su disponibilidad y condición técnica para la continuidad de la operación.
DAN 43	Mantenimiento aeronáutico.	Contiene criterios relacionados con mantenimiento, condición técnica y registros en la aviación tradicional.	Se utiliza como referencia comparativa para identificar dimensiones de mantenimiento y trazabilidad.
DAN 145	Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA).	Establece una estructura formal para organizaciones dedicadas al mantenimiento aeronáutico.	Permite comparar el nivel de organización formal del mantenimiento tradicional con la situación observada para RPAS.
DAN 147	Instrucción y entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento.	Vincula la formación técnica con programas de instrucción, competencias, infraestructura y recursos asociados.	Se utiliza como referencia comparativa para analizar los componentes que pueden resultar pertinentes en una formación especializada.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de las DAN 43, 91, 119, 137, 145, 147 y 151, individualizadas y citadas en las secciones 2.2 y 2.3.*

***Nota**: Las DAN 43, DAN 145 y DAN 147 se utilizan exclusivamente como referencias comparativas del mantenimiento aeronáutico tradicional y de la formación de personal técnico. No se interpretan como normas específicas de mantenimiento de RPAS/drones.*

El diagnóstico normativo establece, por tanto, una primera diferencia entre el nivel de formalización observado en la operación profesional de RPAS y el tratamiento más general de su mantenimiento dentro del marco normativo específicamente relacionado con estos sistemas. Este resultado constituye un indicio de brecha normativa y técnica, pero requiere

ser contrastado con el levantamiento de información antes de establecer sus causas, relevancia y consecuencias formativas. La siguiente etapa del desarrollo incorpora, por ello, antecedentes provenientes de actores vinculados con regulación, utilización, mantenimiento y capacitación de RPAS/drones en Chile.

3.2 Identificación de actores y estrategia de levantamiento de información

A partir del diagnóstico normativo aplicado, se identifica la necesidad de complementar la revisión documental con información proveniente de actores vinculados al sector RPAS/drones en Chile. Esta etapa tiene como finalidad conocer cómo se aborda actualmente el mantenimiento de estos sistemas en la práctica, quiénes participan en dicho proceso, qué componentes requieren mayor atención técnica, qué registros se utilizan y qué competencias pueden resultar pertinentes para una alternativa formativa orientada al mantenimiento de RPAS/drones.

La identificación de actores no busca abarcar la totalidad del mercado nacional de drones, sino trabajar con una muestra exploratoria de organizaciones relevantes para los objetivos de la investigación. Esta decisión responde al carácter aplicado y exploratorio de la memoria y considera restricciones de tiempo, acceso a información y disponibilidad de respuesta por parte de empresas e instituciones. En consecuencia, el levantamiento no se plantea como un estudio estadístico representativo del sector, sino como una aproximación cualitativa destinada a obtener antecedentes que permitan contrastar el diagnóstico normativo y técnico y alimentar posteriormente el análisis de brechas.

Para efectos de esta investigación, los actores se agrupan en seis categorías principales. La primera corresponde a la autoridad aeronáutica, representada por la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), cuyo aporte consiste en complementar la interpretación normativa y contextualizar materias asociadas a operación, certificación, inscripción, registro, trabajos aéreos y situación del mantenimiento de RPAS/drones. La segunda categoría corresponde a organismos públicos que utilizan RPAS/drones en actividades institucionales, fiscalizadoras, territoriales, ambientales, de infraestructura o de emergencia. La tercera considera empresas operadoras o certificadas, utilizadas como referencia para

aproximarse a la gestión técnica de equipos empleados en actividades profesionales o productivas. La cuarta corresponde a servicios técnicos y proveedores especializados, cuyos antecedentes permiten identificar actividades de reparación, calibración, diagnóstico, actualización, revisión de componentes y soporte técnico. La quinta categoría corresponde a entidades de capacitación, mediante las cuales se analiza la oferta formativa actualmente disponible. Finalmente, la sexta categoría considera usuarios industriales o profesionales que emplean RPAS en actividades operativas, técnicas, productivas o institucionales.

La selección de estas categorías se justifica porque cada una permite observar el problema desde una perspectiva distinta y complementaria. La autoridad aeronáutica aporta la dimensión normativa e institucional; los organismos públicos permiten observar prácticas reales de utilización, inspección, mantenimiento y registro; las empresas operadoras y usuarios profesionales permiten contextualizar el empleo de RPAS en actividades productivas; los servicios técnicos permiten identificar intervenciones actualmente disponibles en el mercado; y las entidades de capacitación aportan antecedentes sobre contenidos, duración y orientación de la oferta formativa existente. La combinación de estas perspectivas permite realizar una triangulación cualitativa de antecedentes y reduce la dependencia de una única fuente de información.

El levantamiento se desarrolló mediante tres mecanismos principales: correos de contacto, entrevistas semiestructuradas y solicitudes de acceso a información pública efectuadas conforme a la Ley N.º 20.285 sobre Acceso a la Información Pública. Estos mecanismos fueron seleccionados de acuerdo con el tipo de actor y el nivel de acceso posible a la información. Las entrevistas permiten profundizar en aspectos institucionales que no se encuentran completamente desarrollados en documentos públicos; las solicitudes de información permiten obtener antecedentes formales desde organismos del Estado; y los contactos directos y revisión de información pública permiten incorporar antecedentes de empresas, servicios técnicos y entidades de capacitación cuando no existe obligación de respuesta formal (Ley N.º 20.285, 2008).

En el caso de la DGAC, se realizó una entrevista exploratoria semiestructurada con un representante de la autoridad aeronáutica el 6 de julio de 2026, con el propósito de complementar el análisis normativo con una mirada institucional respecto de operación, certificación, registro, seguridad operacional y situación actual del mantenimiento de RPAS/drones en Chile (representante DGAC, comunicación personal, 6 de julio de 2026). Esta entrevista se utiliza como antecedente cualitativo y no como posición normativa oficial de la institución.

Dentro de las respuestas institucionales recibidas, la Corporación Nacional Forestal (CONAF) entregó antecedentes mediante una carta oficial y minutas asociadas a distintas áreas institucionales, incluyendo información sobre áreas silvestres protegidas, fiscalización forestal y prevención de incendios forestales. Los antecedentes permitieron identificar usos asociados a monitoreo de biodiversidad, patrullajes, fiscalización y análisis del empleo de drones en incendios forestales, además de prácticas de mantenimiento preventivo básico y eventuales derivaciones a servicios técnicos especializados (Corporación Nacional Forestal, 2026).

Asimismo, la Ilustre Municipalidad de Santiago respondió mediante documentación formal asociada a la solicitud vía transparencia Los antecedentes identifican usos de RPAS/drones en áreas como seguridad, comunicaciones, monitoreo territorial, fiscalización, emergencias e inspecciones. La documentación recibida permite observar además diferencias internas en la forma de gestionar el mantenimiento, ya que algunos equipos se encuentran vinculados a proveedores externos, mientras que otros reciben revisiones básicas realizadas por sus propios operadores y no mantienen, en determinadas unidades, registros técnicos sistemáticos de las intervenciones efectuadas (Ilustre Municipalidad de Santiago, 2026).

También se incorporan antecedentes provenientes del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) y de la Dirección de Vialidad. Estas respuestas complementan la caracterización de usos institucionales de RPAS/drones mediante información relacionada con fiscalización, inspección de infraestructura, monitoreo territorial, gestión de baterías, inspecciones previas y posteriores al vuelo, mantenimiento externo, registros parciales y ausencia de determinados

historiales técnicos específicos (Dirección de Vialidad, 2026; Servicio Agrícola y Ganadero, 2026).

Respecto de empresas, servicios técnicos y entidades de capacitación, se realizaron contactos mediante correo electrónico y se revisó información pública disponible. En algunos casos no se obtuvo respuesta técnica suficiente para caracterizar prácticas internas de mantenimiento, por lo que estos antecedentes se complementaron con información publicada en sitios web, programas de capacitación, presupuestos y documentación técnica o comercial disponible. Esta limitación permite diferenciar entre información primaria obtenida directamente desde los actores consultados y antecedentes secundarios utilizados como complemento del análisis.

De manera complementaria, se utilizó información pública proveniente de sitios institucionales, servicios técnicos, programas de capacitación, listados oficiales, normativa y documentación de fabricantes. Esta información permite caracterizar servicios, actividades técnicas y contenidos formativos declarados por distintos actores del sector, aunque no sustituye el levantamiento primario realizado mediante entrevista y solicitudes formales de información.

Tabla 3-2: *Categorías de actores considerados en el levantamiento de información.*

Categoría de actor	Actores considerados	Mecanismo de levantamiento	Aporte para la investigación
Autoridad aeronáutica	Dirección General de Aeronáutica Civil.	Entrevista semiestructurada y revisión normativa.	Complementa el diagnóstico normativo y permite contextualizar la situación del mantenimiento RPAS desde una perspectiva institucional.
Organismos públicos	SAG, Dirección de Vialidad, CONAF, Municipalidad de Santiago y otros organismos consultados.	Solicitudes de acceso a información pública conforme a la Ley N.º 20.285.	Permiten identificar usos institucionales, modalidades de mantenimiento, registros, capacitación y procedimientos aplicados en la práctica.
Empresas operadoras o certificadas	Empresas RPAS con AOC vigente u operadores vinculados a trabajos aéreos.	Contactos por correo y revisión de información pública disponible.	Permiten aproximarse a la utilización profesional de RPAS y a la gestión técnica de equipos en actividades productivas.
Servicios técnicos y proveedores especializados	Geocom, Prodrone, Drone Service Chile y otros servicios identificados.	Contactos por correo, revisión de sitios web y antecedentes públicos disponibles.	Permiten identificar actividades de mantenimiento, reparación, calibración, actualización, diagnóstico y soporte técnico.
Entidades de capacitación	Academia de Drones de Chile, Geoactivos y otras entidades formativas RPAS.	Contactos por correo, revisión de programas públicos y antecedentes comerciales disponibles.	Permiten analizar la oferta formativa existente y contrastarla con una eventual alternativa universitaria.
Usuarios industriales o profesionales	Sectores como minería, energía, agricultura, infraestructura, seguridad, comunicaciones y monitoreo territorial.	Revisión documental, información pública y antecedentes institucionales disponibles.	Permiten relacionar el mantenimiento RPAS con requerimientos de disponibilidad, confiabilidad, continuidad operacional y seguridad.

Fuente: *Elaboración propia a partir de la estrategia de levantamiento y los antecedentes descritos en la sección 3.2.*

Nota: *La muestra tiene carácter exploratorio y no busca representar estadísticamente la totalidad del sector RPAS/drones en Chile. La respuesta técnica obtenida desde algunos actores privados fue limitada, por lo que el análisis se complementa con antecedentes públicos, documentación técnica, programas de capacitación y presupuestos disponibles.*

La estrategia de levantamiento combina, por tanto, fuentes primarias y secundarias. Las fuentes primarias corresponden principalmente a la entrevista semiestructurada, respuestas

directas recibidas mediante contactos y antecedentes obtenidos por solicitudes de acceso a información pública. Las fuentes secundarias comprenden normativa, listados oficiales, sitios web de servicios técnicos, programas de capacitación, documentación de fabricantes y otros antecedentes públicos utilizados para complementar la evidencia obtenida directamente.

La información recopilada permite contrastar el indicio identificado en el diagnóstico normativo respecto de una mayor formalización de la operación de RPAS frente al mantenimiento técnico especializado. Los resultados obtenidos constituyen insumos para determinar si esta diferencia también se manifiesta en las prácticas de los actores consultados y, posteriormente, para estructurar y priorizar las brechas técnicas, normativas, documentales y formativas consideradas en la investigación.

3.3 Resultados del levantamiento de información

El levantamiento de información permitió complementar el diagnóstico normativo con antecedentes prácticos provenientes de actores vinculados al uso, operación, mantenimiento, capacitación y regulación de RPAS/drones en Chile. Los resultados obtenidos no buscan representar estadísticamente la totalidad del sector, sino aportar evidencia exploratoria sobre la forma en que distintos organismos e instituciones utilizan estos sistemas, cómo gestionan su mantenimiento, qué registros mantienen y qué competencias técnicas aparecen como relevantes para el análisis posterior de brechas y de alternativas formativas.

Los antecedentes recopilados provienen de tres grupos principales de fuentes. En primer lugar, se considera una entrevista exploratoria con un representante de la Dirección General de Aeronáutica Civil, orientada a complementar la interpretación normativa desde la perspectiva de un actor perteneciente a la autoridad aeronáutica (representante DGAC, comunicación personal, 6 de julio de 2026). En segundo lugar, se incorporan respuestas institucionales obtenidas mediante solicitudes de acceso a información pública, principalmente de la Corporación Nacional Forestal, la Ilustre Municipalidad de Santiago, el Servicio Agrícola y Ganadero y la Dirección de Vialidad (Corporación Nacional Forestal, 2026; Dirección de Vialidad, 2026; Ilustre Municipalidad de Santiago, 2026; Servicio Agrícola y Ganadero, 2026). En tercer lugar, se consideran antecedentes públicos de servicios

técnicos, proveedores especializados y entidades de capacitación, los cuales permiten observar la existencia de servicios de reparación, mantenimiento, diagnóstico y soporte técnico, así como cursos breves vinculados al mantenimiento de drones (Academia de Drones de Chile, s. f.-a, s. f.-b; Geoactivos, s. f.; Geocom, s. f.; Prodrone, s. f.; Drone Service Chile, s. f.).

Esta combinación de fuentes permite contrastar el análisis normativo con prácticas efectivamente informadas por organismos públicos y con antecedentes disponibles en el mercado nacional de RPAS/drones. No obstante, debido al carácter exploratorio del levantamiento y a la limitada respuesta técnica obtenida desde algunos actores privados contactados, los resultados se interpretan como antecedentes cualitativos para el análisis de brechas y no como una medición exhaustiva del mercado nacional, de la frecuencia de determinadas prácticas de mantenimiento ni de la demanda por formación especializada.

3.3.1 Entrevista exploratoria con representante de la DGAC

Con fecha 6 de julio de 2026, se realizó una entrevista exploratoria semiestructurada con un representante de la Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC), con el propósito de complementar el diagnóstico normativo aplicado y obtener antecedentes respecto de la operación, certificación, registro, seguridad operacional y mantenimiento de RPAS/drones en Chile. La entrevista se utiliza como evidencia cualitativa complementaria y no se interpreta como un pronunciamiento normativo u oficial de la institución. La ficha metodológica correspondiente se incorpora en el Anexo A.

De acuerdo con lo señalado por el entrevistado, la normativa chilena asociada a RPAS/drones presenta un mayor desarrollo explícito en materias de operación, certificación, autorización, registro y seguridad operacional que en mantenimiento técnico específico. En este contexto, no se identificó una figura equivalente a la estructura de mantenimiento aeronáutico tradicional ni una licencia o habilitación específica de la DGAC para un “mantenedor de RPAS/drones” (representante DGAC, comunicación personal, 6 de julio de 2026). Este antecedente es consistente con la diferencia observada previamente mediante la revisión

normativa, aunque por su naturaleza cualitativa debe interpretarse como un elemento de contraste y no como evidencia suficiente por sí sola para establecer una brecha definitiva.

Asimismo, el entrevistado señaló la relevancia que adquieren las instrucciones del fabricante, los manuales técnicos, los componentes y repuestos correspondientes, los procedimientos propios de cada equipo y las actualizaciones de software o firmware dentro de las prácticas asociadas al mantenimiento de RPAS. Este antecedente resulta pertinente para la investigación, ya que permite vincular el mantenimiento de estos sistemas con conocimientos técnicos relacionados con electricidad, electrónica, aviónica, comunicaciones, sensores, baterías, software, firmware y sistemas de control (representante DGAC, comunicación personal, 6 de julio de 2026).

Otro aspecto abordado durante la entrevista corresponde a la posible evolución del sector hacia una mayor diferenciación entre funciones de operación, mantenimiento y gestión técnica. En la conversación se planteó, como hipótesis exploratoria, que actualmente un mismo operador puede asumir funciones de pilotaje, revisión previa al vuelo, determinadas actividades básicas de mantenimiento y gestión documental. Sin embargo, una eventual mayor complejidad de los equipos, de las aplicaciones profesionales y de las exigencias de seguridad operacional podría favorecer una especialización progresiva de las funciones técnicas asociadas al mantenimiento de RPAS/drones (representante DGAC, comunicación personal, 6 de julio de 2026).

Los antecedentes obtenidos mediante la entrevista aportan, por tanto, elementos para continuar evaluando la pertinencia de una respuesta formativa especializada en la Universidad Técnica Federico Santa María, pero no determinan por sí solos su modalidad ni alcance. En esta etapa se identifican como áreas potencialmente relevantes la electricidad, electrónica, aviónica, comunicaciones, documentación técnica, procedimientos de fabricante, software, firmware, baterías, sensores y seguridad operacional. La pertinencia y nivel de profundidad de estas áreas se contrastan posteriormente con las respuestas de organismos públicos, la oferta técnica y formativa existente y el análisis curricular desarrollado en la investigación.

3.3.2 Resultados obtenidos mediante solicitudes de acceso a información pública

Las solicitudes de acceso a información pública permitieron obtener antecedentes institucionales sobre el uso y mantenimiento de RPAS/drones en organismos públicos. En particular, se consideran las respuestas del Servicio Agrícola y Ganadero, la Dirección de Vialidad, la Corporación Nacional Forestal y la Ilustre Municipalidad de Santiago. Estos antecedentes permiten observar distintos tipos de utilización, modalidades de mantenimiento, existencia o ausencia de registros técnicos, mecanismos de derivación a servicios especializados y formas de capacitación del personal operador. No obstante, los resultados deben interpretarse como evidencia exploratoria correspondiente a organismos específicos y no como una representación de la totalidad de instituciones públicas que utilizan RPAS/drones en Chile.

Con el propósito de facilitar la verificación y trazabilidad de los antecedentes utilizados, las respuestas institucionales recibidas mediante solicitudes de acceso a información pública conforme a la Ley N.º 20.285 se encuentran disponibles en un repositorio digital complementario. Los documentos se presentan en versiones destinadas a consulta académica, resguardando los datos personales y la información sujeta a restricciones legales de publicidad.

En el caso del Servicio Agrícola y Ganadero (SAG), se informó que la institución dispone de equipos RPAS utilizados en labores de prospección, detección, análisis, fiscalización y otras actividades institucionales. Entre las aplicaciones señaladas se encuentran labores relacionadas con avifauna e influenza aviar, análisis de cultivos asociados al comportamiento de plagas y fiscalización de actividades vinculadas al programa SIRSDS. Los equipos son de propiedad del Servicio, aunque algunos han sido adquiridos mediante fondos concursables o regionales destinados a proyectos específicos (Servicio Agrícola y Ganadero, 2026).

Respecto del mantenimiento, el SAG informó que las intervenciones se realizan de acuerdo con las indicaciones del fabricante y que, en términos generales, se externalizan mediante licitación pública u otros mecanismos legalmente disponibles para el Servicio. Entre las

actividades informadas se encuentran la revisión de fuselaje, hélices, motores, tren de aterrizaje y gimbal, junto con la actualización de firmware de los mandos y del software asociado. Asimismo, la institución señaló que al momento de la respuesta no mantenía bitácoras de vuelo, aunque se encontraba elaborando formatos físicos y digitales para responder a nuevas exigencias operacionales asociadas a la normativa DGAC (Servicio Agrícola y Ganadero, 2026).

En el caso de la Dirección de Vialidad, se informó que el Departamento de Puentes utiliza drones desde el año 2020 en actividades de inspección de puentes, levantamiento de imágenes, registros visuales de estructuras, levantamientos geométricos, generación de modelos tridimensionales, nubes de puntos, modelos de elevación y apoyo en emergencias. Los equipos también han sido utilizados para monitorear cauces y entornos asociados a infraestructura vial (Dirección de Vialidad, 2026).

La Dirección de Vialidad señaló que los equipos son de propiedad institucional y que el mantenimiento se realiza mediante empresas que disponen de servicio técnico autorizado por las marcas correspondientes. Además, se informaron procedimientos de revisión antes y después del vuelo, incluyendo inspección del estado general del RPA y sus accesorios, cámaras, baterías, hélices, sensores, brújula o magnetómetro, centro de gravedad, sistema de posicionamiento global (GPS), recepción de satélites, señales de radio y video, sistemas de seguridad y retorno automático. También se identificó una gestión específica de baterías mediante control y registro de uso, carga por pares identificados, recomendaciones de almacenamiento y control de niveles mínimos de carga (Dirección de Vialidad, 2026).

En materia documental, la institución informó que dispone de antecedentes sobre accesorios del RPA, planes de vuelo, adquisición y reparaciones externas, pero que no ha implementado un seguimiento formal del historial de fallas ni registros de actualizaciones de firmware o software. Asimismo, la respuesta señala que los operadores deben contar con credencial otorgada por la DGAC y que la habilitación para operar contempla formación teórica y práctica impartida externamente, además de conocimientos asociados a normativa, calibración, operación y seguridad. Este antecedente permite distinguir la capacitación

requerida para la operación de RPAS de una eventual formación especializada en su mantenimiento técnico (Dirección de Vialidad, 2026).

En el caso de la Corporación Nacional Forestal (CONAF), la respuesta institucional incorporó antecedentes provenientes de distintas áreas, por lo que las prácticas observadas no resultan homogéneas dentro de la organización. La Gerencia de Áreas Silvestres Protegidas informó que los drones se utilizan principalmente para labores de monitoreo de biodiversidad y patrullajes. Los equipos provienen principalmente de fondos de terceros asociados a convenios de colaboración o de fondos regionales. Asimismo, se indicó que los encargados regionales fueron capacitados para realizar mantenimiento preventivo básico, principalmente limpieza y conservación de la carga de las baterías. Frente a requerimientos de mayor alcance, los equipos pueden ser derivados a un servicio técnico especializado o dados de baja, según corresponda. La misma respuesta señala que no existe una base nacional sistematizada que concentre este tipo de antecedentes (Corporación Nacional Forestal, 2026).

Como complemento de estos antecedentes, CONAF adjuntó el *Protocolo de utilización de RPA institucional en el SNASPE*, documento que incorpora lineamientos técnicos relacionados con preparación de la operación, baterías, firmware, calibraciones y listas de verificación. El protocolo establece además la importancia de registrar las operaciones de vuelo, señalando que el historial de horas de utilización permite apoyar decisiones proactivas de mantenimiento. Asimismo, contempla formularios de chequeo para gabinete, prevuelo y postvuelo, asociados a una base de datos de uso de los equipos (Corporación Nacional Forestal, 2022).

La Gerencia de Fiscalización Forestal y Evaluación Ambiental de CONAF informó, por su parte, que utiliza RPAS/drones en actividades de fiscalización relacionadas con el cumplimiento de la legislación forestal. Los equipos son propios y, cuando se requiere, el mantenimiento básico es realizado por el propio operador en dependencias internas. También se efectúa una lista de verificación previa al vuelo. Sin embargo, esta área señaló que no mantiene registros de mantenimiento de los equipos. Asimismo, la respuesta indica que los

operadores cuentan con credencial de operador de RPAS extendida por la DGAC (Corporación Nacional Forestal, 2026).

La Gerencia de Protección de Incendios Forestales informó que la utilización de RPAS/drones en incendios forestales se mantenía en análisis y evaluación junto con la autoridad aeronáutica, debido al nivel de riesgo y complejidad técnica de este tipo de operación. Entre los objetivos considerados se encuentran el monitoreo y evaluación de incendios forestales y el cálculo de parámetros técnicos asociados a su comportamiento y proyección. La respuesta destaca además la relevancia de la seguridad operacional y señala que los aspectos vinculados al mantenimiento técnico se ejecutan conforme a los estándares y protocolos considerados dentro del Certificado Especial de Operación CEO 1065-A con que cuenta CONAF (Corporación Nacional Forestal, 2026).

Los antecedentes de CONAF permiten observar, por tanto, diferencias entre unidades pertenecientes a una misma institución. Mientras algunas áreas disponen de protocolos, formularios de chequeo y capacitación para actividades preventivas básicas, otras informan mantenimiento realizado por el propio operador y ausencia de registros técnicos sistemáticos. Este resultado constituye un antecedente relevante para analizar posteriormente la heterogeneidad de procedimientos, documentación y responsabilidades asociadas al mantenimiento.

La Ilustre Municipalidad de Santiago entregó antecedentes provenientes de distintas unidades municipales. La Dirección de Prevención y Seguridad Comunitaria informó que dispone de un sistema RPAS correspondiente al modelo DJI Matrice 350 RTK, de propiedad municipal desde fines de 2024. Según la respuesta institucional, el equipo fue adquirido mediante compra directa a Geocom y el contrato de adquisición contempla también la prestación del servicio de mantenimiento. El RPAS se utiliza principalmente para apoyo a operaciones de seguridad, asistencia a policías y funcionarios municipales, levantamientos planimétricos e inspecciones técnicas. Parte de los antecedentes específicos relativos a revisiones técnicas, programas de mantenimiento, registros, bitácoras, historial de fallas, reparaciones,

inspecciones, ciclos de baterías y actualizaciones de firmware o software fue reservada por razones de seguridad (Ilustre Municipalidad de Santiago, 2026).

La Dirección de Comunicaciones de la Ilustre Municipalidad de Santiago informó que dispone de un equipo identificado en la documentación recibida como DJI Mavic Air 3, utilizado principalmente para cobertura de actividades municipales, generación de material comunicacional, apoyo a otras direcciones, seguridad, fiscalización, emergencias, monitoreo territorial, imágenes de interés turístico e inspecciones de obras. El equipo es de propiedad municipal y las revisiones básicas son realizadas por el mismo personal audiovisual que lo opera, sin utilización de un proveedor externo ni derivación a servicio técnico desde su adquisición (Ilustre Municipalidad de Santiago, 2026).

Respecto de las actividades técnicas realizadas sobre este equipo, la Dirección de Comunicaciones indicó que no se ha efectuado mantenimiento de mayor profundidad. Las acciones informadas incluyen actualizaciones, limpieza, carga y revisión de baterías, inspección preventiva y revisión externa de hélices, motores, sensores, firmware y software. Asimismo, se señaló que no se mantienen bitácoras, historiales de fallas, reparaciones, inspecciones, ciclos de batería ni registros de actualizaciones, más allá de la información proporcionada por la aplicación asociada al equipo. La unidad indicó además que la institución no ha proporcionado capacitación específica al profesional que opera el RPAS, por lo que su experiencia se sustenta principalmente en conocimientos previos y práctica adquirida. No obstante, la misma respuesta informa que dicho profesional se encontraba en proceso de renovación de su certificación de piloto RPAS otorgada por la DGAC (Ilustre Municipalidad de Santiago, 2026).

En conjunto, las respuestas institucionales muestran que los RPAS/drones son utilizados en actividades públicas diversas, incluyendo fiscalización, inspección de infraestructura, monitoreo territorial, biodiversidad, seguridad, comunicaciones, emergencias y apoyo operativo. Asimismo, permiten observar una heterogeneidad relevante en la forma de gestionar su condición técnica: mientras algunos organismos recurren a proveedores o servicios técnicos externos, otros asignan determinadas actividades básicas al propio

operador; del mismo modo, existen diferencias en el grado de utilización de listas de chequeo, registros, bitácoras, historiales de fallas y procedimientos documentados.

Estos resultados no permiten establecer por sí solos una brecha generalizable a todo el sector público chileno. Sin embargo, proporcionan evidencia empírica para analizar posteriormente las dimensiones técnica, documental, normativa y formativa. En particular, permiten examinar la relación entre mantenimiento realizado por el operador, externalización de intervenciones, aplicación de instrucciones de fabricante, capacitación disponible, sistematización de registros y trazabilidad de las actividades efectuadas.

Las respuestas institucionales utilizadas como respaldo del presente análisis se encuentran disponibles para consulta en el repositorio documental complementario identificado en el Anexo E.

3.3.3 Antecedentes de servicios técnicos y entidades de capacitación

De manera complementaria a las respuestas institucionales, se revisaron antecedentes públicos de servicios técnicos privados y entidades de capacitación vinculadas al sector RPAS/drones. Esta información permite observar que, además del uso institucional de estos sistemas, existe en el mercado nacional una oferta orientada a reparación, mantenimiento, diagnóstico, actualización, calibración, soporte técnico y capacitación práctica asociada a drones.

Entre los servicios técnicos identificados se encuentran Geocom, Prodrone y Drone Service Chile. Las actividades declaradas por estos proveedores comprenden, según cada servicio, diagnóstico, revisión técnica, reparación, actualización de firmware, calibración, pruebas funcionales, reemplazo de componentes y soporte especializado. Estos antecedentes permiten observar que el mantenimiento de RPAS/drones ya es abordado comercialmente mediante intervenciones que involucran componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos, digitales y de navegación, y no únicamente mediante reparación de daños físicos visibles (Geocom, s. f.; Prodrone, s. f.; Drone Service Chile, s. f.).

En materia de capacitación, se identificaron ofertas privadas específicamente relacionadas con mantenimiento de drones. La Academia de Drones de Chile dispone de un curso de mantenimiento de drones orientado a complementar conocimientos asociados a mantenimiento preventivo y reconocimiento de fallas recurrentes. El antecedente programático revisado corresponde a una jornada de ocho horas cátedra, desarrollada mediante componentes teóricos y prácticos, e incluye contenidos de electrónica básica, hardware, motores, sensores, baterías, mando, software, aplicaciones DJI, detección de fallas mediante hardware y software, desarme parcial, limpieza y recomendaciones generales (Academia de Drones de Chile, s. f.-a; véase Anexo B).

Asimismo, se revisó el programa de *Mantenimiento y reparación de drones agrícolas DJI*, organizado en dos jornadas y orientado a mantenimiento avanzado, diagnóstico de fallas, reparación y calibración. Entre sus contenidos se consideran estrategias de mantenimiento preventivo, inspección y limpieza de componentes críticos, utilización de herramientas de diagnóstico, interpretación de códigos de error y telemetría, desarmado seguro, reconocimiento de componentes electrónicos, reparación, reemplazo de motores, controladores electrónicos de velocidad (ESC, por sus siglas en inglés *Electronic Speed Controller*), hélices y sistemas de aviónica, además de calibración de sensores y sistemas de navegación y pruebas posteriores a la reparación (Academia de Drones de Chile, s. f.-b; véase Anexo C).

De manera complementaria, Geoactivos dispone de una oferta de capacitación en mantenimiento de drones que incorpora contenidos relacionados con identificación de componentes, diagnóstico de fallas, revisión de motores y hélices, controladores electrónicos de velocidad, sensores, baterías, calibraciones, firmware y listas de verificación de mantenimiento. Este antecedente amplía la evidencia de oferta privada existente y permite observar que los contenidos asociados al mantenimiento técnico son abordados por más de un actor del mercado nacional (Geoactivos, s. f.).

En conjunto, estas ofertas muestran que existen contenidos técnicos recurrentes dentro de la capacitación privada, entre ellos inspección, mantenimiento preventivo, diagnóstico,

reparación, calibración, actualización de software o firmware, baterías, sensores, motores y reemplazo de componentes. Sin embargo, los antecedentes identificados corresponden principalmente a cursos o programas acotados, orientados a habilidades prácticas y, en algunos casos, a plataformas o aplicaciones específicas. La existencia de esta oferta constituye evidencia de que el mantenimiento de drones ya es abordado como materia de capacitación técnica en Chile, pero no permite inferir por sí sola la magnitud de la demanda, la disposición a pagar ni la cantidad de potenciales participantes de una eventual oferta universitaria.

***Tabla 3-3**:Antecedentes de oferta privada vinculada al mantenimiento de RPAS/drones.*

Actor / antecedente	Tipo de oferta	Contenidos o servicios identificados	Aporte para la investigación
Geocom	Servicio técnico especializado	Inspección, revisión, mantenimiento, actualización, calibración, gestión de baterías, reemplazo de componentes y soporte técnico.	Evidencia la existencia de proveedores especializados que realizan intervenciones técnicas sobre drones/UAS.
Prodrone	Servicio técnico de drones	Reparación, diagnóstico, soporte técnico y servicios asociados a drones.	Permite observar actividades privadas vinculadas con diagnóstico, reparación y mantenimiento de RPAS/drones.
Drone Service Chile	Servicio técnico especializado	Reparación, revisión y soporte técnico de drones.	Complementa la identificación de actores privados dedicados al mantenimiento y soporte técnico.
Academia de Drones de Chile – Curso de mantenimiento de drones	Curso breve de mantenimiento	Electrónica básica, hardware, motores, sensores, baterías, mando, software, detección de fallas, desarme parcial, limpieza y recomendaciones.	Evidencia una oferta práctica de corta duración orientada principalmente a mantenimiento preventivo, reconocimiento de fallas y comprensión básica del sistema.
Academia de Drones de Chile – Mantenimiento y reparación de drones agrícolas DJI	Programa práctico especializado	Mantenimiento preventivo, diagnóstico, telemetría, desarme, reparación, motores, ESC, hélices, aviónica, sensores, navegación, calibración y pruebas posteriores a la reparación.	Evidencia una oferta de mayor profundidad técnica y especializada en una aplicación y familia de plataformas determinadas.
Geoactivos – Curso de mantenimiento de drones	Curso técnico de mantenimiento	Componentes del dron, diagnóstico de fallas, motores, hélices, ESC, sensores, baterías, calibraciones, firmware y listas de verificación.	Aporta un segundo referente privado de capacitación y permite contrastar contenidos recurrentes dentro de la oferta nacional.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de los proveedores y programas de capacitación citados en la sección 3.3.3 y los Anexos B y C.*

***Nota:** Los antecedentes de capacitación privada se utilizan como evidencia exploratoria de oferta existente.*

La comparación de estos antecedentes permite identificar posibles elementos de diferenciación para evaluar posteriormente una alternativa académica en la USM. Mientras las ofertas privadas revisadas se concentran principalmente en actividades prácticas de inspección, mantenimiento básico o avanzado, diagnóstico, reparación y calibración, una

propuesta universitaria puede ser evaluada respecto de una integración más amplia entre fundamentos técnicos, electricidad y electrónica, navegación y comunicaciones, documentación, procedimientos de fabricante, trazabilidad y seguridad operacional. La pertinencia de incorporar estos elementos y el nivel de profundidad requerido se determina posteriormente mediante el análisis de brechas y la evaluación de alternativas formativas.

Por lo tanto, los antecedentes revisados no se utilizan para sostener que exista una demanda determinada por un curso de la USM, sino para demostrar que el mantenimiento de drones constituye una materia actualmente abordada tanto mediante servicios técnicos como mediante capacitación privada. Esta evidencia, combinada con los resultados institucionales y normativos obtenidos previamente, proporciona un nuevo insumo para analizar la pertinencia, alcance y eventual diferenciación de una alternativa formativa especializada.

3.3.4 Síntesis comparativa de resultados

El contraste entre los antecedentes recopilados permite identificar diferencias relevantes entre instituciones y actores respecto del tipo de utilización de RPAS/drones, la modalidad mediante la cual se gestiona su condición técnica, el nivel de documentación disponible, la capacitación del personal y la dependencia de operadores, proveedores o servicios especializados. Estas diferencias no permiten caracterizar estadísticamente al sector nacional, pero constituyen patrones exploratorios útiles para estructurar posteriormente el análisis de brechas.

La entrevista exploratoria con un representante de la Dirección General de Aeronáutica Civil se considera un antecedente complementario para contextualizar el marco normativo y la situación del mantenimiento de RPAS/drones en Chile. Por esta razón, no se incorpora en la matriz comparativa de usuarios y prestadores de servicios, dado que su función dentro de la investigación corresponde principalmente a aportar una perspectiva institucional sobre regulación, certificación, registro y mantenimiento, y no a describir la gestión directa de una flota determinada. Sus antecedentes se utilizan posteriormente junto con las demás fuentes

para interpretar las diferencias observadas y estructurar el análisis de brechas (representante DGAC, comunicación personal, 6 de julio de 2026).

***Tabla 3-4**: Matriz de hallazgos del levantamiento de información.*

Actor / institución	**Uso o vínculo con RPAS/drones**	**Mantenimiento observado u oferta identificada**	**Registros y capacitación**	**Lectura para el análisis de brechas**
Servicio Agrícola y Ganadero	Prospección, detección, fiscalización, avifauna, análisis de cultivos y plagas.	Mantenimiento conforme a indicaciones del fabricante y, en términos generales, externalizado mediante licitación u otros mecanismos institucionales. Comprende revisión de fuselaje, hélices, motores, tren de aterrizaje, gimbal, firmware y software.	Al momento de la respuesta no se mantenían bitácoras de vuelo; se encontraban en elaboración formatos físicos y digitales de registro.	Evidencia utilización institucional y dependencia de procedimientos de fabricante y servicios externos, junto con una necesidad de fortalecer sistematización y trazabilidad documental.
Dirección de Vialidad	Inspección de puentes e infraestructura, levantamientos técnicos y 3D, monitoreo de cauces y apoyo en emergencias.	Mantenimiento mediante servicios técnicos autorizados por las marcas, complementado con inspecciones antes y después del vuelo y gestión específica de baterías.	Mantiene registros de vuelos, baterías, accesorios, adquisición y reparaciones externas; no dispone de seguimiento formal de fallas ni de actualizaciones de firmware/software. Los operadores cuentan con formación y credencial para operación.	Constituye un caso de uso técnico-profesional con prácticas sistemáticas de inspección y mantenimiento externo, pero con trazabilidad técnica parcial.
Corporación Nacional Forestal	Monitoreo de biodiversidad, patrullajes, fiscalización forestal y evaluación de utilización en incendios forestales.	Las prácticas varían entre áreas: mantenimiento preventivo básico por personal capacitado, derivación a servicio técnico para intervenciones mayores y mantenimiento básico realizado por el propio operador.	La Gerencia de Áreas Silvestres Protegidas dispone de protocolo, listas de chequeo y mecanismos de registro; la Gerencia de Fiscalización informó ausencia de registros de mantenimiento.	Evidencia heterogeneidad dentro de una misma institución respecto de procedimientos, responsabilidades, documentación y profundidad del mantenimiento.

Ilustre Municipalidad de Santiago	Seguridad, comunicaciones, fiscalización, monitoreo territorial, emergencias, inspecciones y registros audiovisuales.	En Prevención y Seguridad Comunitaria el mantenimiento se encuentra asociado a un proveedor externo; en Comunicaciones se realizan revisiones básicas por el propio operador.	Parte de los antecedentes técnicos del área de seguridad se encuentran reservados. En Comunicaciones no se mantienen registros sistemáticos ni se informó capacitación institucional específica en mantenimiento.	Evidencia diferencias internas entre modalidades de mantenimiento, trazabilidad y capacitación según el área y finalidad de utilización del RPAS.
Servicios técnicos privados	Reparación, diagnóstico, calibración, actualización, mantenimiento y soporte técnico.	Geocom, Prodrone y Drone Service Chile declaran servicios asociados a mantenimiento y soporte de componentes físicos, electrónicos, sensores, baterías, firmware y otros sistemas.	La información pública revisada no permite caracterizar de manera suficiente los sistemas internos de registro o capacitación de cada proveedor.	Evidencian la existencia de una oferta privada especializada para atender necesidades de mantenimiento, reparación y soporte técnico; no permiten cuantificar demanda ni tamaño de mercado.
Entidades de capacitación	Formación privada en mantenimiento, diagnóstico y reparación de drones.	Academia de Drones de Chile y Geoactivos presentan cursos o programas prácticos que incluyen mantenimiento preventivo, diagnóstico, motores, baterías, sensores, software/firmware, calibraciones y otros contenidos técnicos.	Se dispone de programas y antecedentes formativos declarados por las entidades, con extensiones y niveles de profundidad acotados según cada oferta.	Evidencian una oferta formativa privada existente, pero no permiten inferir demanda cuantificada ni equivalencia con una formación universitaria o aeronáutica formal.

Fuente *Elaboración propia a partir de las respuestas institucionales y la oferta privada analizadas en las secciones 3.3.2 y 3.3.3.*

Nota *La matriz sintetiza antecedentes de carácter exploratorio y no representa estadísticamente la totalidad del sector RPAS/drones en Chile. La información proveniente de sitios web y programas privados corresponde a antecedentes declarados públicamente por cada entidad y se utiliza como referencia de oferta existente, no como evidencia de demanda cuantificada.*

A partir de la comparación se identifican distintos patrones relevantes para la investigación. En primer lugar, los RPAS/drones se utilizan en actividades institucionales de naturaleza diversa, incluyendo fiscalización, inspección de infraestructura, monitoreo ambiental, patrullajes, seguridad, comunicaciones, emergencias y levantamientos técnicos. Esto confirma que los sistemas analizados participan en funciones profesionales donde la disponibilidad y condición técnica del equipo pueden tener incidencia sobre la continuidad y seguridad de la actividad desarrollada.

En segundo lugar, la gestión del mantenimiento presenta un grado importante de heterogeneidad. Mientras algunas instituciones recurren a servicios técnicos autorizados o proveedores externos, otras asignan al propio operador actividades preventivas básicas, inspecciones y revisiones funcionales. Esta heterogeneidad se observa incluso entre unidades pertenecientes a una misma organización, como ocurre en CONAF y en la Municipalidad de Santiago, por lo que no resulta adecuado asumir un modelo único de mantenimiento para el conjunto de actores analizados.

En tercer lugar, la trazabilidad documental también presenta niveles diferentes. La Dirección de Vialidad mantiene registros de vuelos, baterías, accesorios y reparaciones externas, pero no un seguimiento formal del historial de fallas o actualizaciones de firmware/software. En CONAF se observan áreas con protocolos, formularios de chequeo y mecanismos de registro, mientras otras unidades informan ausencia de registros de mantenimiento. En la Dirección de Comunicaciones de la Municipalidad de Santiago tampoco se identificaron bitácoras o historiales técnicos sistemáticos. Estos antecedentes convierten la documentación, el registro de intervenciones y la trazabilidad en dimensiones pertinentes para el posterior análisis de brechas.

En cuarto lugar, los componentes y actividades técnicas mencionados por instituciones, fabricantes y servicios privados presentan correspondencia con las áreas identificadas previamente en el Estado del Arte. Entre ellas se encuentran baterías, hélices, motores, sensores, cámaras y gimbal, firmware y software, sistemas de navegación, señales de radio y video, brújula o magnetómetro, retorno automático y procedimientos de calibración. Esta convergencia respalda el tratamiento del mantenimiento de RPAS como un ámbito multidisciplinario que combina elementos mecánicos, eléctricos, electrónicos, digitales, de navegación, comunicaciones y documentación técnica.

En quinto lugar, las respuestas institucionales permiten distinguir entre capacitación para la operación y formación especializada para el mantenimiento. En algunos organismos se evidencia capacitación formal, conocimiento normativo y credenciales asociadas a la operación de RPAS, mientras que las competencias específicas de mantenimiento aparecen

de manera menos homogénea: pueden derivar de instrucciones de fabricante, capacitación preventiva básica, experiencia del operador, proveedores especializados o cursos privados. La existencia de ofertas privadas de mantenimiento demuestra que esta materia ya forma parte de la capacitación disponible en el mercado, pero no permite determinar la magnitud de su demanda ni establecer que exista un perfil profesional homogéneo de mantenedor de RPAS.

En conjunto, los resultados son compatibles con el indicio identificado en el diagnóstico normativo: la operación de RPAS presenta mecanismos formales claramente identificables, mientras que las prácticas asociadas a mantenimiento, documentación y formación técnica muestran una mayor diversidad entre los actores observados. Esta diferencia no se interpreta todavía como una causa raíz ni como una brecha generalizable a todo el sector, sino como evidencia que debe ser estructurada y priorizada en la etapa siguiente.

Por esta razón, los hallazgos obtenidos constituyen la base empírica para el análisis de brechas técnicas, normativas, documentales y formativas desarrollado a continuación. En dicha etapa se examinan sus posibles causas, relaciones y nivel de relevancia, evitando que la propuesta académica derive únicamente de una apreciación cualitativa o de una solución definida previamente.

3.4 Análisis de brechas técnicas, normativas y formativas

A partir del diagnóstico normativo aplicado, la caracterización técnica y los resultados del levantamiento de información, se identifican diferencias asociadas al mantenimiento de RPAS/drones en las dimensiones normativa, técnica, documental y formativa. Estas diferencias no se interpretan como ausencia absoluta de prácticas de mantenimiento, responsabilidades técnicas o capacitación, sino como distintos grados de formalización, sistematización, trazabilidad y especialización observados en los antecedentes analizados.

Para efectos de esta investigación, una brecha corresponde a la diferencia entre la situación observada y una condición de referencia considerada pertinente para el mantenimiento profesionalizado de RPAS/drones. La situación observada se construye a partir de la

normativa nacional, la entrevista exploratoria con un representante de la DGAC, las respuestas institucionales obtenidas mediante solicitudes de acceso a información pública, los antecedentes de servicios técnicos y capacitación privada y la revisión de las capacidades formativas existentes en la USM. La condición de referencia no corresponde a un estándar normativo creado para esta memoria, sino que se deriva del contraste con criterios de mantenimiento aeronáutico tradicional, referentes internacionales, documentación de fabricantes y prácticas relacionadas con condición técnica, competencias, documentación y trazabilidad revisadas en el Estado del Arte.

El análisis se organiza en cuatro dimensiones principales. La dimensión normativa considera la diferencia entre el grado de formalización explícita de la operación de RPAS y la menor especificidad observada para su mantenimiento técnico. La dimensión técnica comprende los conocimientos y habilidades asociados a inspección, diagnóstico, verificación e intervención de estructura, propulsión, baterías, sistemas eléctricos y electrónicos, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware y cargas útiles. La dimensión documental aborda la sistematización de registros de mantenimiento, fallas, inspecciones, reparaciones, baterías, actualizaciones y otras intervenciones técnicas. Finalmente, la dimensión formativa analiza la relación entre estas necesidades específicas y las capacidades existentes en la formación aeronáutica de la USM y en otras ofertas de capacitación revisadas. La seguridad operacional se considera un criterio transversal a las cuatro dimensiones y no como una brecha independiente.

Tabla 3-5: *Dimensiones consideradas para el análisis de brechas técnicas, normativas, documentales y formativas.*

Dimensión de brecha	Situación observada	Implicancia para la investigación	Relación con la alternativa formativa
Normativa	La operación, autorización, registro y certificación de RPAS se encuentran desarrolladas de manera más explícita que la regulación específica de su mantenimiento técnico.	Permite identificar una diferencia entre formalización operacional y formalización técnica del mantenimiento, sin asumir ausencia de responsabilidades sobre la condición del equipo.	Justifica incorporar contenidos sobre marco normativo RPAS, límites de intervención, responsabilidades, seguridad operacional y relación con procedimientos de fabricante.
Técnica	El mantenimiento de RPAS involucra componentes mecánicos, eléctricos, electrónicos y digitales, además de sistemas de propulsión, baterías, navegación, comunicaciones, sensores, software, firmware y cargas útiles.	Evidencia que el mantenimiento requiere una aproximación multidisciplinaria y no puede reducirse únicamente a reparación física básica.	Orienta la definición de contenidos asociados a electricidad, electrónica, aviónica, comunicaciones, navegación, baterías, sensores, software, diagnóstico y verificación funcional.
Documental	Las prácticas de registro observadas son heterogéneas. Algunos organismos mantienen controles de vuelo, baterías, accesorios o reparaciones, mientras otros no disponen de historiales sistemáticos de mantenimiento, fallas o actualizaciones.	Permite identificar diferencias en trazabilidad, documentación de mantenimiento y seguimiento de la condición técnica del equipo.	Justifica incorporar competencias sobre bitácoras, historial técnico, registros de baterías, fallas, inspecciones, reparaciones, actualizaciones y trazabilidad de intervenciones.
Formativa	La capacitación formal observada en organismos se encuentra principalmente asociada a operación, normativa y credenciales de piloto, mientras que la formación específica en mantenimiento presenta modalidades diversas y se complementa con procedimientos de fabricante, capacitación interna, servicios especializados y cursos privados.	Permite evaluar la pertinencia de una formación más sistemática y especializada, sin asumir previamente su modalidad ni demanda.	Proporciona criterios para comparar alternativas formativas según profundidad técnica, público objetivo, contenidos, recursos necesarios y capacidades académicas disponibles en la USM.

Fuente *Elaboración propia a partir del diagnóstico normativo, técnico, documental y formativo desarrollado en las secciones 3.1 a 3.3.*

Nota *Las brechas identificadas no implican ausencia total de mantenimiento, capacitación o responsabilidades técnicas. Representan diferencias observadas en el grado de formalización, sistematización, trazabilidad y especialización asociadas al mantenimiento de RPAS/drones. Debido al carácter exploratorio del levantamiento, estas diferencias no se extrapolan estadísticamente a la totalidad del sector nacional.*

A partir de estas dimensiones, el análisis avanza desde la identificación de diferencias generales hacia el examen específico de sus manifestaciones, factores asociados y consecuencias para una eventual respuesta formativa. La finalidad no consiste en convertir automáticamente cada hallazgo en un contenido académico, sino en determinar cuáles presentan suficiente respaldo y relevancia para ser considerados posteriormente en la evaluación de alternativas.

Las siguientes subsecciones desarrollan individualmente las brechas normativa, técnica, documental y formativa, junto con el papel transversal que cumplen los procedimientos e instrucciones de fabricante. Una vez analizadas estas dimensiones, los hallazgos se integran mediante un análisis causal y un procedimiento formal de priorización, con el propósito de identificar cuáles factores requieren mayor atención dentro de la alternativa formativa evaluada.

3.4.1 Brecha normativa

El marco normativo chileno directamente relacionado con RPAS/drones se encuentra principalmente orientado a materias de operación, autorización, registro, credencial de piloto a distancia, certificación de operadores y trabajos aéreos. La DAN 151, *Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas*; la DAN 91, *Reglas del aire*; la DAN 119, *Normas para obtención de Certificado de Operador Aéreo (AOC)*; y la DAN 137, *Trabajos aéreos*, permiten identificar mecanismos formales asociados a distintas dimensiones de la operación profesional de estos sistemas en Chile (DGAC, 2023b, 2024a, 2025b, 2026a). Asimismo, los antecedentes publicados por la autoridad respecto de empresas RPAS con Certificado de Operador Aéreo vigente y actividades de capacitación evidencian la existencia de actores incorporados formalmente al sistema aeronáutico (DGAC, 2026c).

En contraste, el mantenimiento técnico específico de RPAS/drones presenta un menor grado de desarrollo explícito dentro del conjunto normativo directamente asociado a estos sistemas. La DAN 151 exige que, antes de iniciar una operación, el piloto determine que el RPA se encuentre en condiciones seguras para operar y establece determinadas condiciones técnicas para su utilización; sin embargo, no desarrolla un programa integral de mantenimiento específico para RPAS ni establece una figura equivalente a un personal técnico especializado exclusivamente en su mantenimiento (DGAC, 2024a). Esta diferencia permite identificar una brecha de especificidad normativa entre la formalización operacional y el tratamiento del mantenimiento técnico.

Las DAN 43, *Mantenimiento*; DAN 145, *Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)*; y DAN 147, *Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento*, proporcionan referentes relevantes desde la aviación tradicional. Estas normas permiten observar cómo se estructuran materias asociadas a mantenimiento, condición técnica, registros, organización de las intervenciones, competencias e instrucción de personal. No obstante, no corresponden a normativa específica de mantenimiento de RPAS/drones y, por tanto, se utilizan en esta memoria únicamente con fines comparativos (DGAC, 2023a, 2024b, 2025a).

La entrevista exploratoria realizada con un representante de la DGAC aporta un antecedente consistente con esta interpretación. De acuerdo con lo señalado por el entrevistado, la regulación asociada a RPAS presenta un desarrollo más visible en materias de operación, autorización, certificación, registro y seguridad operacional que en mantenimiento técnico específico. Asimismo, durante la entrevista no se identificó una licencia o habilitación específica de la DGAC para una figura denominada “mantenedor de RPAS/drones” (representante DGAC, comunicación personal, 6 de julio de 2026). Este antecedente se utiliza como evidencia cualitativa complementaria y no como pronunciamiento normativo oficial de la institución.

En consecuencia, la brecha normativa identificada no corresponde a una ausencia de obligaciones respecto de la condición técnica de los RPAS ni implica que actualmente no se

desarrollen actividades de mantenimiento. Se refiere, específicamente, a un menor grado de especificidad y formalización del mantenimiento técnico dentro del marco normativo directamente asociado a RPAS, en comparación con la estructura normativa existente para el mantenimiento aeronáutico tradicional.

Desde una perspectiva formativa, esta brecha constituye un criterio para evaluar la incorporación de contenidos relacionados con normativa RPAS, responsabilidades y límites de intervención, condición segura del equipo, relación con instrucciones de fabricante, documentación técnica, trazabilidad y seguridad operacional. La profundidad y modalidad con que dichos contenidos deban incorporarse se determina posteriormente mediante la priorización de brechas y la evaluación de alternativas formativas.

3.4.2 Brecha técnica

Los antecedentes revisados muestran que el mantenimiento de RPAS/drones no se limita al reemplazo de componentes visibles ni a revisiones básicas del equipo. Estos sistemas integran componentes estructurales, eléctricos, electrónicos y digitales, junto con sistemas de propulsión, baterías, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware y cargas útiles. Desde una perspectiva sistémica, un RPAS comprende además la aeronave pilotada a distancia, la estación de pilotaje remoto, los enlaces de comunicación y otros elementos requeridos para desarrollar la operación prevista, por lo que su mantenimiento requiere una aproximación técnica multidisciplinaria (ICAO, 2015, 2017).

Esta diversidad también se observa en la documentación técnica de fabricante. En el caso del DJI Matrice 350 RTK se identifican, entre otros elementos, motores, hélices, baterías inteligentes, antenas de transmisión y navegación, sistemas de visión, sensores infrarrojos, cámara, gimbal, puertos de carga útil, tren de aterrizaje y distintos componentes electrónicos asociados al funcionamiento de la plataforma (DJI, 2024). La condición técnica de un RPAS puede depender, por tanto, de la interacción de sistemas con características y procedimientos de inspección diferentes.

Los antecedentes institucionales obtenidos durante el levantamiento presentan una correspondencia con esta caracterización. Entre los componentes y sistemas mencionados se encuentran baterías, hélices, motores, tren de aterrizaje, sensores, cámaras, gimbal, brújula o magnetómetro, sistemas de posicionamiento, comunicaciones de radio y video, mecanismos de retorno automático y actualizaciones de firmware y software. Estas actividades vinculan el mantenimiento de RPAS con conocimientos de electricidad, electrónica, aviónica, comunicaciones, navegación, sistemas digitales, diagnóstico y documentación técnica.

La Dirección de Vialidad constituye un caso relevante de utilización técnico-profesional. La institución informó la realización de inspecciones antes y después del vuelo, verificación de cámaras, baterías, hélices, sensores, brújula o magnetómetro, sistemas de posicionamiento, señales de radio y video y mecanismos de seguridad y retorno automático, además de una gestión específica de baterías. El mantenimiento de mayor alcance se realiza mediante servicios técnicos autorizados por las marcas correspondientes (Dirección de Vialidad, 2026).

En otros organismos se identifican esquemas diferentes. En CONAF existen áreas donde personal capacitado realiza actividades preventivas básicas y las intervenciones de mayor alcance se derivan a servicios especializados, mientras que otras unidades informan mantenimiento básico efectuado por el propio operador. Asimismo, el protocolo utilizado por Áreas Silvestres Protegidas incorpora listas de chequeo, manejo de baterías, firmware y mecanismos de registro asociados a la utilización de los equipos (Corporación Nacional Forestal, 2022, 2026). En la Dirección de Comunicaciones de la Municipalidad de Santiago, por su parte, se informaron actividades de limpieza, actualización y revisión preventiva de hélices, motores, sensores, baterías, firmware y software realizadas por el mismo personal que opera el equipo (Ilustre Municipalidad de Santiago, 2026).

Estos resultados permiten distinguir distintos grados de intervención técnica sin asumir que correspondan a categorías regulatorias oficiales. En un extremo se encuentran actividades básicas de inspección y conservación que pueden ser realizadas por el usuario u operador dentro de los límites establecidos por el fabricante. En un segundo nivel aparecen actividades que requieren mayores conocimientos técnicos, herramientas, diagnóstico, calibración o

intervención sobre componentes. Finalmente, en operaciones profesionales resulta relevante una dimensión de gestión técnica orientada a disponibilidad, continuidad operacional y trazabilidad, que incorpora seguimiento de condición, registros, historial de fallas, reparaciones y actualizaciones.

Tabla 3-6: *Niveles de intervención técnica identificados para el mantenimiento de RPAS/drones.*

Nivel de intervención o gestión	**Características observadas**	**Ejemplos de actividades**	**Implicancia formativa**
Mantenimiento básico de usuario u operador	Actividades de inspección, cuidado y conservación general realizadas dentro del alcance permitido por el fabricante y las capacidades del operador.	Limpieza, inspección visual, revisión básica de hélices, motores, sensores y baterías; verificación previa al vuelo y actualizaciones simples de software o firmware.	Requiere competencias básicas de inspección, identificación de anomalías, cuidado del equipo, seguridad operacional y reconocimiento de los límites de intervención.
Revisión o mantenimiento técnico especializado	Actividades que requieren mayor conocimiento técnico, utilización de herramientas, diagnóstico, calibración o intervención de componentes.	Diagnóstico de fallas, calibración, análisis de sensores y telemetría, reemplazo de componentes, revisión de sistemas de navegación y comunicaciones, firmware y procedimientos específicos de fabricante.	Requiere formación en electricidad, electrónica, aviónica, comunicaciones, navegación, sensores, software, firmware, diagnóstico y utilización de documentación técnica.
Gestión técnica orientada a continuidad operacional y trazabilidad	Actividades destinadas a administrar la condición técnica del equipo y apoyar su disponibilidad y confiabilidad en operaciones profesionales o institucionales.	Control de baterías, historial de fallas, registros de inspección y mantenimiento, seguimiento de reparaciones, actualizaciones de software/firmware, pruebas funcionales y documentación técnica.	Requiere competencias en documentación, trazabilidad, seguridad operacional, gestión del mantenimiento y análisis de condición del equipo.

Fuente *Elaboración propia a partir de las prácticas de mantenimiento y los antecedentes técnicos analizados en las secciones 2.4 y 3.3.*

Nota *Los niveles presentados corresponden a una clasificación analítica elaborada para ordenar los diferentes grados de intervención y gestión técnica identificados en los antecedentes revisados. No constituyen categorías regulatorias oficiales ni habilitaciones profesionales. El alcance efectivo de cualquier intervención depende de la plataforma, documentación del fabricante, competencias disponibles y restricciones aplicables.*

La brecha técnica no consiste, por tanto, en una ausencia de mantenimiento, sino en la diferencia entre las actividades básicas que pueden ser desarrolladas por un operador y las competencias requeridas para abordar de forma sistemática tareas de diagnóstico, intervención, documentación y gestión de la condición técnica en RPAS utilizados profesionalmente. La evidencia revisada muestra que la profundidad de las actividades varía según la plataforma, el uso, la organización y el mecanismo de soporte disponible.

Desde la perspectiva formativa, esta brecha indica que una eventual alternativa especializada no debería limitarse al reconocimiento de componentes o a procedimientos básicos de limpieza y revisión. La formación debe ser evaluada respecto de su capacidad para desarrollar competencias en funcionamiento integral del RPAS, diagnóstico, aplicación de procedimientos de fabricante, interpretación de documentación técnica, registro de intervenciones y relación entre condición técnica, confiabilidad y seguridad operacional. La extensión concreta de estas competencias se definirá a partir de la priorización desarrollada posteriormente.

3.4.3 Brecha documental y de trazabilidad

Uno de los patrones más consistentes identificados durante el levantamiento corresponde a la heterogeneidad de los registros asociados a la utilización y condición técnica de RPAS/drones. Algunas instituciones disponen de registros de vuelos, baterías, accesorios, reparaciones externas, listas de verificación o planes de vuelo, mientras que en otros casos no existen historiales sistemáticos de mantenimiento, fallas, reparaciones, ciclos de batería o actualizaciones de software y firmware.

Para efectos de esta investigación, la trazabilidad técnica se entiende como la posibilidad de reconstruir de manera ordenada el historial de utilización, inspecciones, fallas, intervenciones, reparaciones, reemplazos, actualizaciones y verificaciones efectuadas sobre un equipo. Esta definición se utiliza como criterio analítico y no como una exigencia normativa específica para RPAS/drones. Como referencia comparativa, el mantenimiento aeronáutico tradicional incorpora la documentación y los registros como componentes

relevantes para respaldar las intervenciones realizadas y la condición técnica de los equipos (DGAC, 2024b).

El Servicio Agrícola y Ganadero (SAG) informó que al momento de su respuesta no mantenía bitácoras de vuelo y que se encontraba desarrollando formatos físicos y digitales para registrar sus operaciones, en el contexto de adecuaciones internas relacionadas con nuevas exigencias de la DGAC (Servicio Agrícola y Ganadero, 2026). Este antecedente evidencia un proceso de fortalecimiento documental; sin embargo, una bitácora de vuelo no constituye por sí sola un historial de mantenimiento, por lo que debe distinguirse entre registros operacionales y documentación específicamente asociada a la condición técnica e intervenciones del equipo.

La Corporación Nacional Forestal (CONAF) presenta una situación heterogénea entre sus distintas áreas. La Gerencia de Áreas Silvestres Protegidas dispone de un protocolo institucional que incorpora formularios de chequeo de gabinete, prevuelo y postvuelo, además de mecanismos para mantener una base de datos de utilización de los equipos. El mismo protocolo vincula el registro de las operaciones con la posibilidad de utilizar el historial de uso como antecedente para decisiones de mantenimiento (Corporación Nacional Forestal, 2022). En contraste, la Gerencia de Fiscalización Forestal y Evaluación Ambiental informó que, aun cuando se realizan listas de verificación antes del vuelo y mantenimiento básico por parte del operador, no se mantienen registros de mantenimiento de los equipos (Corporación Nacional Forestal, 2026). Esta diferencia interna refuerza el carácter heterogéneo de las prácticas documentales observadas.

La Ilustre Municipalidad de Santiago también evidencia diferencias entre sus unidades. Mientras parte de la información técnica correspondiente al RPAS utilizado por Prevención y Seguridad Comunitaria fue reservada por razones de seguridad, la Dirección de Comunicaciones informó expresamente que no mantiene bitácoras, historiales de fallas, reparaciones, inspecciones, ciclos de batería ni registros de actualizaciones de firmware o software, más allá de la información almacenada internamente por la aplicación asociada al equipo (Ilustre Municipalidad de Santiago, 2026).

La Dirección de Vialidad presenta un nivel distinto de documentación. La institución informó registros de vuelos, uso de baterías, accesorios, adquisición y reparaciones externas, además de procedimientos de revisión antes y después de la operación. Sin embargo, señaló que no se ha implementado un seguimiento formal del historial de fallas ni registros sistemáticos de actualizaciones de firmware o software (Dirección de Vialidad, 2026). Este caso permite observar que la existencia de determinados registros no implica necesariamente disponer de una trazabilidad técnica integrada de todas las intervenciones y cambios relevantes efectuados sobre el RPAS.

En conjunto, estos antecedentes permiten identificar una brecha documental y de trazabilidad caracterizada por distintos niveles de sistematización entre los actores analizados. La brecha no corresponde a una ausencia general de documentación, sino a diferencias en el tipo de registro utilizado, su continuidad, nivel de detalle y capacidad para reconstruir la historia técnica del equipo.

Esta dimensión adquiere relevancia porque el mantenimiento profesionalizado no depende únicamente de ejecutar una inspección o reparación. También resulta necesario disponer, según el nivel de utilización y criticidad de la operación, de antecedentes que permitan conocer qué intervención se realizó, cuándo se efectuó, qué componente fue revisado o reemplazado, qué anomalía motivó la acción, quién realizó la actividad y qué verificaciones posteriores fueron efectuadas. Una documentación sistemática puede apoyar la identificación de fallas recurrentes, el seguimiento de componentes sujetos a desgaste, la gestión de baterías, el control de cambios digitales y la decisión de intervenir o derivar el equipo a un servicio especializado.

***Tabla 3-7**: Registros técnicos relevantes para la trazabilidad del mantenimiento de RPAS/drones.*

Tipo de registro técnico	Propósito	Relación con el mantenimiento RPAS
Bitácora o registro de utilización del equipo	Documentar operaciones realizadas, fechas, duración, operador y antecedentes generales de utilización.	Puede aportar información sobre intensidad y condiciones de uso para relacionarlas con inspecciones o actividades de mantenimiento cuando corresponda. No reemplaza un registro específico de mantenimiento.
Registro de inspección previa y posterior al vuelo	Documentar revisiones visuales y funcionales de hélices, motores, sensores, baterías, estructura, alertas y otros elementos del sistema.	Permite identificar anomalías antes o después de una operación y dejar evidencia de las verificaciones efectuadas.
Historial de fallas y anomalías	Registrar síntomas, alertas, códigos de error, recurrencia de fallas y acciones correctivas adoptadas.	Facilita la identificación de patrones, reincidencias y criterios para diagnóstico, intervención o derivación.
Registro de mantenimiento o reparación	Documentar intervenciones efectuadas, componentes reemplazados, fecha, responsable o proveedor y resultado de la revisión.	Permite reconstruir el historial técnico del equipo y fortalecer la trazabilidad de las intervenciones.
Registro de baterías	Controlar identificación, utilización, ciclos cuando estén disponibles, condición física, almacenamiento, carga y comportamiento observado.	Apoya el seguimiento de componentes críticos para autonomía, disponibilidad y seguridad operacional.
Registro de software y firmware	Documentar versiones instaladas, actualizaciones, fechas, compatibilidad y cambios de configuración relevantes.	Permite controlar modificaciones digitales que pueden afectar funcionamiento, sensores, navegación, comunicaciones o compatibilidad del sistema.
Registro de calibraciones y pruebas funcionales	Documentar calibraciones de sensores, brújula o magnetómetro, IMU, navegación, cámaras o gimbal, junto con verificaciones posteriores a una intervención.	Permite respaldar las verificaciones realizadas sobre la condición funcional del sistema antes de retornar el equipo a operación.

***Fuente** Elaboración propia a partir de los registros y prácticas documentales analizados en las secciones 2.3 y 3.3.*

***Nota** Los registros indicados corresponden a una síntesis analítica elaborada a partir de los antecedentes revisados y de referencias comparativas de mantenimiento. No constituyen una exigencia normativa específica para RPAS/drones en Chile ni implican que todos los registros deban aplicarse con el mismo nivel de profundidad a cualquier plataforma u operación.*

Desde la perspectiva formativa, esta brecha permite identificar la documentación y trazabilidad como competencias susceptibles de ser incorporadas en una alternativa especializada. Entre los contenidos potenciales se encuentran elaboración e interpretación de bitácoras y listas de verificación, historial de fallas, documentación de intervenciones, control

de baterías, registro de actualizaciones, calibraciones, pruebas funcionales y criterios para respaldar la condición técnica del equipo.

No obstante, la incorporación y profundidad de estos contenidos no se establece únicamente a partir de esta dimensión. Su relevancia relativa será contrastada posteriormente con las demás brechas identificadas y con el procedimiento de priorización desarrollado al cierre del análisis, de manera de evitar que cada diferencia observada se traduzca automáticamente en un componente curricular.

3.4.4 Brecha formativa

La carrera Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico (TUMA) de la Universidad Técnica Federico Santa María constituye una referencia curricular institucional pertinente para el análisis, debido a que su formación incorpora capacidades relacionadas con mantenimiento preventivo, correctivo y recuperativo, sistemas eléctricos y electrónicos, sistemas digitales, microprocesadores, aviónica, estructuras, gestión del mantenimiento y seguridad operacional (USM, s. f.-b). Estas capacidades presentan una base compatible con varias de las dimensiones técnicas identificadas previamente para el mantenimiento de RPAS/drones.

Sin embargo, los RPAS/drones presentan configuraciones y tecnologías cuya aplicación específica no necesariamente forma parte del alcance de la formación aeronáutica tradicional revisada. Entre ellas se encuentran la propulsión eléctrica aplicada a plataformas no tripuladas, baterías inteligentes, controladores y sistemas de vuelo, sensores de navegación, enlaces inalámbricos, telemetría, software y firmware de configuración, cargas útiles especializadas, sistemas automáticos de retorno, herramientas de fabricante y documentación técnica particular de cada plataforma. Estas características se relacionan con la naturaleza sistémica de los RPAS, integrados por aeronave, estación de pilotaje remoto, enlaces de comunicación y otros componentes necesarios para la operación prevista (ICAO, 2015, 2017; DJI, 2024).

Por esta razón, la brecha formativa no se interpreta como una carencia general de capacidades técnicas en TUMA, sino como una diferencia entre una base aeronáutica existente y la aplicación especializada de dichas competencias al mantenimiento de RPAS/drones. Parte de los conocimientos disponibles puede ser transferida o adaptada, mientras que otras materias requieren contenidos específicos asociados a arquitectura RPAS, tecnologías propias de estas plataformas, procedimientos de fabricante, herramientas digitales, trazabilidad documental y criterios de intervención o derivación.

Los antecedentes de capacitación privada complementan esta interpretación. La Academia de Drones de Chile ofrece programas breves relacionados con mantenimiento preventivo, diagnóstico, reparación, electrónica, motores, sensores, baterías, software, firmware, telemetría y calibración, mientras que Geoactivos dispone de una oferta que incluye componentes, diagnóstico de fallas, motores, hélices, controladores electrónicos de velocidad, sensores, baterías, firmware y listas de verificación (Academia de Drones de Chile, s. f.-a, s. f.-b; Geoactivos, s. f.). Estos antecedentes evidencian que el mantenimiento de drones ya es abordado como materia de capacitación técnica en el mercado nacional, aunque no permiten inferir por sí solos la magnitud de la demanda ni equivalen necesariamente a una formación académica universitaria vinculada al ámbito aeronáutico.

El levantamiento institucional también muestra diferencias entre la formación asociada a la operación y aquella relacionada específicamente con mantenimiento. En la Dirección de Vialidad, por ejemplo, los operadores deben contar con credencial DGAC y formación teórica y práctica para la operación de RPAS, mientras que las intervenciones de mantenimiento de mayor alcance se derivan a servicios técnicos autorizados por las marcas. En CONAF se identificaron además experiencias de capacitación orientadas a mantenimiento preventivo básico en determinadas unidades. Estos antecedentes permiten observar que las competencias de operación, inspección básica y mantenimiento especializado no corresponden necesariamente al mismo nivel de formación ni al mismo alcance técnico (Dirección de Vialidad, 2026; Corporación Nacional Forestal, 2026).

***Tabla 3-8**:Relación entre capacidades formativas de TUMA USM y requerimientos específicos identificados para el mantenimiento de RPAS/drones.*

Área formativa o técnica	Capacidades relacionadas presentes en la formación TUMA revisada	Requerimientos específicos identificados para RPAS/drones	Brecha identificada
Mantenimiento aeronáutico	Formación asociada a mantenimiento preventivo, correctivo y recuperativo de aeronaves y sistemas.	Aplicación a componentes RPAS, inspecciones específicas, procedimientos de fabricante, verificación funcional y criterios de intervención o derivación.	Requiere adaptar principios de mantenimiento al contexto de plataformas no tripuladas y a procedimientos específicos de fabricante.
Sistemas eléctricos y electrónicos	Base relacionada con sistemas eléctricos, electrónicos, digitales y microprocesadores.	Diagnóstico de motores eléctricos, controladores electrónicos de velocidad (ESC), baterías inteligentes, sensores, conectores, cableado y distribución de energía.	Requiere especialización en arquitectura eléctrica y electrónica característica de RPAS.
Aviónica y navegación	Base vinculada a aviónica y sistemas asociados a aeronaves.	Sistemas globales de navegación por satélite (GNSS), posicionamiento cinemático en tiempo real (RTK), unidad de medición inercial (IMU), brújula o magnetómetro, sensores de visión y sistemas automáticos de retorno.	Requiere aplicación específica a navegación autónoma, sensores integrados y funciones automatizadas propias de RPAS.
Comunicaciones	Conocimientos relacionados con sistemas aeronáuticos, eléctricos y electrónicos.	Enlaces inalámbricos, telemetría, señales de radio y video y enlace de mando y control entre aeronave y estación de pilotaje remoto.	Requiere profundizar en las comunicaciones propias de RPAS y su relación con diagnóstico y seguridad operacional.
Software y firmware	Base indirectamente relacionada mediante sistemas digitales, electrónica y microprocesadores.	Actualizaciones, configuración, compatibilidad, alertas, telemetría, herramientas de fabricante, control de versiones y diagnóstico digital.	Requiere incorporar herramientas y procedimientos específicos de software y firmware utilizados en plataformas RPAS.
Documentación técnica y gestión del mantenimiento	Capacidades relacionadas con gestión del mantenimiento aeronáutico y documentación técnica.	Bitácoras, listas de verificación, historial de fallas, registros de baterías, intervenciones, actualizaciones, calibraciones y pruebas funcionales.	Requiere aplicación específica de documentación y trazabilidad al ciclo técnico de RPAS/drones.
Seguridad operacional	Formación compatible con principios de seguridad operacional aeronáutica.	Relación entre condición técnica del RPAS y operación segura, baterías, fallas de sensores, pérdida o degradación de enlaces, configuración, navegación y respuesta frente a anomalías.	Requiere contextualizar los principios de seguridad operacional a riesgos y comportamientos propios de sistemas no tripulados.

***Fuente** Elaboración propia a partir de la formación TUMA (USM, s. f.-b) y de los requerimientos RPAS analizados en las secciones 2.4 y 3.3.*

La comparación permite identificar que una parte importante de las capacidades requeridas no parte desde cero, sino que puede apoyarse en conocimientos ya presentes en la formación

aeronáutica de la USM. La brecha se concentra, por tanto, en la adaptación, integración y profundización de estas capacidades para tecnologías y procedimientos específicos de RPAS/drones, especialmente en arquitectura eléctrica y electrónica, sensores y navegación, comunicaciones, software y firmware, procedimientos de fabricante y trazabilidad técnica.

Este resultado respalda la pertinencia de evaluar una alternativa formativa complementaria o especializada, pero no determina por sí solo su modalidad, duración ni público objetivo. TUMA constituye una referencia institucional relevante para el análisis de capacidades existentes, mientras que una eventual propuesta puede considerar también técnicos y profesionales de áreas afines que posean conocimientos de ingreso compatibles. La selección de la modalidad formativa debe realizarse posteriormente mediante la comparación de alternativas, considerando las brechas priorizadas, el nivel de profundidad técnica requerido, las capacidades académicas de la USM y las condiciones de implementación.

3.4.5 Tratamiento de procedimientos de fabricante

Un aspecto transversal al mantenimiento de RPAS/drones corresponde a la utilización de procedimientos, documentación y herramientas definidos por los fabricantes. Dependiendo de la plataforma, actividades como inspección, calibración, actualización, diagnóstico, reemplazo de componentes, configuración y verificación funcional pueden estar condicionadas por instrucciones técnicas, manuales, aplicaciones, alertas del sistema y criterios establecidos por el fabricante. Esta situación se observa tanto en documentación pública de fabricantes como en servicios técnicos especializados, donde se consideran actividades de revisión de componentes, actualización de firmware, calibración, diagnóstico, reparación y reemplazo de elementos conforme a características específicas de cada plataforma (DJI, 2024; DJI, s. f.; DJI Enterprise, s. f.; Geocom, s. f.; Prodrone, s. f.).

Esta dependencia tecnológica introduce una consideración relevante para la formación. Una alternativa académica no debería basarse exclusivamente en los procedimientos de una única marca o modelo, pero tampoco puede ignorar que la intervención técnica de un RPAS debe realizarse respetando los límites, compatibilidades y procedimientos definidos para cada

equipo. Por esta razón, el objetivo formativo no consiste en reproducir manuales propietarios ni convertir la propuesta en una capacitación comercial asociada a un fabricante específico, sino desarrollar la capacidad de interpretar documentación técnica, reconocer límites de intervención, aplicar procedimientos básicos de inspección y diagnóstico y determinar cuándo una anomalía requiere derivación a un servicio técnico especializado.[2]

Este enfoque resulta consistente con antecedentes internacionales que asignan relevancia a las instrucciones de mantenimiento y a las competencias del personal encargado de ejecutar o supervisar determinadas actividades técnicas. La Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA), por ejemplo, establece que el mantenimiento de UAS debe considerar la documentación aplicable, las instrucciones de mantenimiento y, según la categoría y nivel de riesgo de la operación, personal con la formación y cualificación correspondientes (AESA, 2022).

Desde esta perspectiva, los procedimientos de fabricante se incorporan como un criterio transversal dentro de la formación y no como una especialización centrada en una plataforma específica. Esto permite desarrollar competencias transferibles entre diferentes RPAS, tales como lectura e interpretación de manuales, reconocimiento de advertencias y limitaciones, revisión de alertas, control de versiones de software y firmware, análisis de compatibilidad, inspección y calibración básica, documentación de intervenciones y criterios de derivación.

[2] Para efectos de esta memoria, se utilizan manuales de usuario, documentación pública de fabricantes, información técnica disponible públicamente, antecedentes programáticos y sitios web de servicios especializados. No se utilizan manuales internos, documentación propietaria no publicada ni información confidencial de fabricantes o servicios técnicos.

Tabla 3-9*:Tratamiento formativo de procedimientos de fabricante en mantenimiento RPAS/drones.*

Elemento asociado al fabricante	Tratamiento en la alternativa formativa	Propósito formativo
Manuales de usuario y documentación técnica pública	Desarrollar lectura e interpretación de instrucciones, advertencias, limitaciones de operación, mantenimiento y procedimientos básicos.	Fortalecer la capacidad de utilizar documentación técnica aplicable sin depender exclusivamente de un modelo o fabricante específico.
Aplicaciones y software de configuración	Analizar alertas, configuraciones, versiones, actualizaciones, compatibilidad y registros disponibles en herramientas de fabricante.	Desarrollar criterios básicos de diagnóstico digital, control de versiones y trazabilidad de cambios.
Procedimientos de inspección y calibración	Revisar criterios generales para inspección, calibración de sensores, brújula o magnetómetro, unidad de medición inercial (IMU), sistemas de navegación, cámaras y gimbal.	Preparar al participante para interpretar y ejecutar procedimientos dentro del alcance definido por la documentación técnica.
Límites de intervención	Distinguir entre acciones de usuario u operador, mantenimiento básico, revisión especializada y situaciones que requieren derivación a servicio técnico.	Evitar intervenciones que excedan las competencias disponibles o los límites definidos para la plataforma.
Repuestos y componentes compatibles	Analizar criterios de compatibilidad, reemplazo, identificación de componentes críticos y riesgos asociados al uso de elementos inadecuados.	Relacionar decisiones de mantenimiento con confiabilidad, seguridad operacional y continuidad del equipo.
Derivación a servicio técnico especializado	Identificar situaciones en las que una falla, daño o intervención excede el alcance disponible y requiere soporte especializado.	Fortalecer la toma de decisiones técnicas y el resguardo de la condición segura del RPAS.

Fuente *Elaboración propia a partir de los procedimientos de fabricante y servicios técnicos citados en las secciones 2.4 y 3.3.*

Nota *La tabla no reproduce procedimientos oficiales de un fabricante específico. Corresponde a una síntesis formativa elaborada para desarrollar competencias de interpretación documental, identificación de límites de intervención, diagnóstico inicial y derivación a servicios especializados. Los procedimientos aplicables a una plataforma determinada deberán seguir siempre la documentación técnica vigente correspondiente.*

El tratamiento de procedimientos de fabricante permite, por tanto, equilibrar dos necesidades. Por una parte, reconoce que las características técnicas, herramientas, compatibilidades y límites de intervención varían entre plataformas. Por otra, evita que la propuesta académica quede restringida a una capacitación comercial asociada a un único fabricante. Esta aproximación favorece el desarrollo de competencias transferibles y permite que la formación pueda actualizarse a medida que evolucionen las tecnologías y plataformas utilizadas en el sector RPAS.

En el análisis de brechas, esta dimensión se considera un factor transversal que influye especialmente sobre las brechas técnica, documental y formativa. La dependencia de procedimientos particulares de fabricante no constituye por sí sola una deficiencia del sector; sin embargo, aumenta la importancia de desarrollar competencias para interpretar documentación, reconocer límites técnicos, registrar intervenciones y tomar decisiones fundadas respecto de mantenimiento o derivación. Este factor será incorporado posteriormente en el análisis causal y en la priorización de las brechas identificadas.

3.4.6 Síntesis, análisis causal y priorización de brechas

La integración del diagnóstico normativo, el levantamiento institucional, la caracterización técnica, la revisión curricular y los antecedentes de servicios y capacitación permite consolidar las brechas identificadas y distinguirlas de aquellos factores que actúan transversalmente sobre ellas. La síntesis no implica ausencia de mantenimiento, formación o responsabilidades técnicas, sino diferencias en el grado de formalización, sistematización, trazabilidad y especialización observadas en los antecedentes analizados.

Tabla 3-10:*Síntesis de brechas y factores transversales identificados.*

Dimensión o factor	Situación observada	Implicancia para la propuesta formativa
Brecha normativa	La normativa directamente asociada a RPAS desarrolla de manera explícita aspectos de operación, autorización, registro, certificación y trabajos aéreos, mientras que el mantenimiento técnico específico presenta un menor grado de desarrollo dentro de este marco.	Incorporar normativa RPAS, responsabilidades, condición segura del equipo, límites de intervención y relación con procedimientos de fabricante, sin trasladar automáticamente requisitos de la aviación tradicional.
Brecha técnica	Los RPAS integran sistemas estructurales, eléctricos, electrónicos y digitales, además de propulsión, baterías, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware y cargas útiles.	Desarrollar competencias de inspección, diagnóstico, electricidad, electrónica, aviónica, navegación, comunicaciones, baterías, sensores, software, firmware y verificación funcional.
Brecha documental y de trazabilidad	Los registros observados presentan distintos niveles de sistematización. Existen organismos con controles de vuelos, baterías, reparaciones o listas de chequeo, mientras otros no disponen de historiales integrados de mantenimiento, fallas o actualizaciones.	Incorporar bitácoras, registros de inspección, historial de fallas, documentación de intervenciones, control de baterías, actualizaciones, calibraciones, pruebas funcionales y trazabilidad.
Brecha formativa	La formación aeronáutica de la USM proporciona capacidades compatibles, pero su aplicación específica a tecnologías y procedimientos propios de RPAS requiere adaptación y profundización. La oferta privada identificada aborda mantenimiento mediante programas principalmente breves o específicos.	Evaluar una alternativa complementaria que aproveche capacidades existentes y desarrolle competencias específicas para RPAS, sin asumir que TUMA sea el único perfil de ingreso ni predeterminar la modalidad académica.
Procedimientos de fabricante – factor transversal	Determinadas intervenciones, configuraciones, actualizaciones, calibraciones y límites técnicos dependen de documentación, aplicaciones y procedimientos particulares de cada plataforma.	Formar en interpretación de documentación técnica, compatibilidad, límites de intervención, control de versiones y criterios de derivación, evitando una formación dependiente de una única marca.
Seguridad operacional – criterio transversal	La condición segura del RPAS depende no solo de componentes físicos, sino también de baterías, sensores, navegación, comunicaciones, configuraciones, software, firmware y respuesta frente a anomalías.	Integrar criterios de seguridad operacional a las actividades de inspección, diagnóstico, documentación y decisión de intervención o derivación.

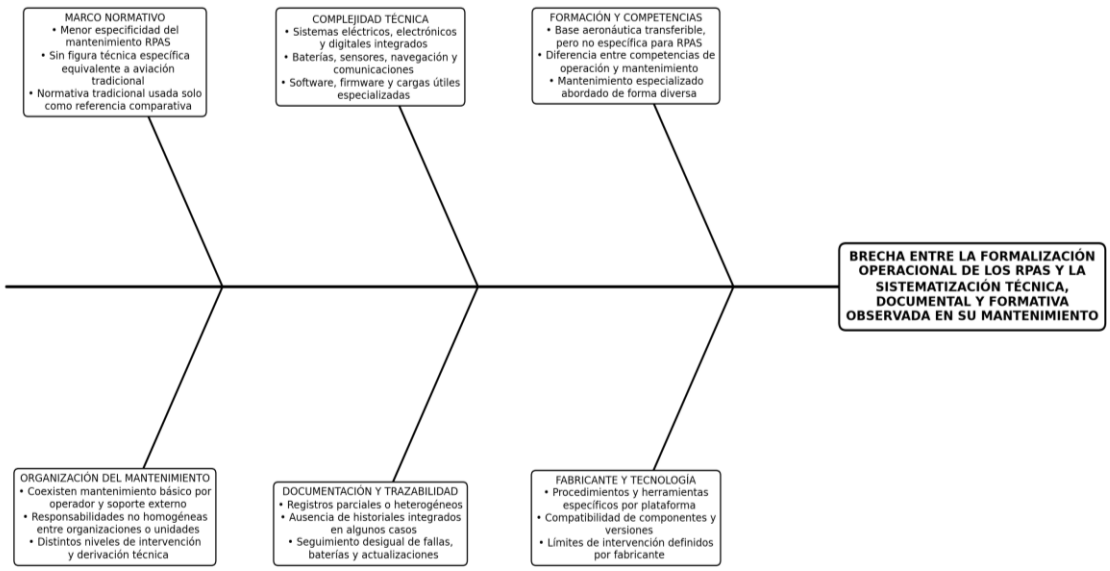
Fuente: *Elaboración propia a partir del análisis de brechas desarrollado en las secciones 3.1 a 3.4.5.*

Nota: *Las brechas sintetizadas no se interpretan como ausencia total de mantenimiento, capacitación o responsabilidades técnicas. La seguridad operacional y los procedimientos de fabricante se consideran factores transversales y no brechas independientes.*

3.4.6.1 Análisis causal de las brechas

Con el propósito de estructurar las relaciones entre los hallazgos identificados, se aplica un análisis causal mediante un diagrama de Ishikawa. Esta herramienta permite organizar causas y subcausas asociadas al problema investigado sin reducirlo a una única explicación. Debido al carácter exploratorio de la investigación, el diagrama se utiliza como herramienta de estructuración cualitativa y no como demostración de causalidad estadística.

El efecto central considerado corresponde a la brecha entre la formalización operacional de los RPAS y la sistematización técnica, documental y formativa observada en su mantenimiento. A partir de los resultados desarrollados en las subsecciones anteriores se identifican seis familias de factores asociados: marco normativo, organización de las actividades de mantenimiento, complejidad técnica de los RPAS, documentación y trazabilidad, formación y competencias, y procedimientos y tecnologías de fabricante.



Figuras 3-1*:Análisis causal de las brechas asociadas al mantenimiento de RPAS/drones mediante diagrama de Ishikawa.*

Fuente: *Elaboración propia a partir del diagnóstico normativo, levantamiento de información, revisión curricular y antecedentes técnicos desarrollados en la investigación.*

El análisis causal permite observar que las brechas no responden a una única deficiencia. La menor especificidad normativa constituye parte del contexto, pero las diferencias observadas también se relacionan con la complejidad tecnológica de los sistemas, la diversidad de modalidades de mantenimiento, el grado de sistematización documental, la especialización de las competencias disponibles y la dependencia de procedimientos propios de cada plataforma.

3.4.6.2 Priorización de factores asociados.

Para evitar que todas las brechas y causas identificadas reciban el mismo nivel de atención, se aplica una matriz multicriterio de priorización. Considerando que el levantamiento tiene carácter exploratorio y no estadísticamente representativo, no se asignan probabilidades ni frecuencias sectoriales. En su lugar, se utiliza la recurrencia o convergencia del factor entre distintas fuentes como criterio de evidencia.

Se consideran cuatro criterios, evaluados en una escala de 1 a 3:

- R – Recurrencia de la evidencia: 1 = antecedente aislado; 2 = presente en más de una fuente o tipo de evidencia; 3 = observado de forma convergente en múltiples fuentes o categorías de actores.
- I – Impacto técnico-operacional: 1 = impacto limitado; 2 = incidencia relevante sobre disponibilidad, confiabilidad o mantenimiento; 3 = incidencia elevada sobre condición técnica, continuidad o seguridad operacional.
- P – Relevancia para la profesionalización del mantenimiento: 1 = baja; 2 = media; 3 = alta.
- A – Abordabilidad mediante formación: 1 = escasamente abordable mediante una alternativa académica; 2 = parcialmente abordable; 3 = directamente abordable mediante competencias y contenidos formativos.

El puntaje total se determina mediante:

$$P_{total} = R + I + P + A$$

Se considera prioridad alta un resultado de 11 a 12 puntos, prioridad media de 8 a 10 puntos y prioridad baja de 4 a 7 puntos. Los criterios se ponderan de manera equivalente para evitar introducir ponderaciones adicionales que no cuentan con evidencia empírica suficiente para ser justificadas.

Tabla 3-11*:Matriz multicriterio de priorización de factores asociados a las brechas identificadas.*

Factor asociado	R	I	P	A	Total	Prioridad
Complejidad técnica y multidisciplinaria de los RPAS	3	3	3	3	**12**	**Alta**
Heterogeneidad documental y de trazabilidad	3	2	3	3	**11**	**Alta**
Necesidad de adaptación y especialización formativa para RPAS	3	2	3	3	**11**	**Alta**
Diversidad de responsabilidades y modalidades de mantenimiento	3	2	3	2	**10**	Media
Dependencia de procedimientos y tecnologías de fabricante	3	2	2	3	**10**	Media
Menor especificidad normativa del mantenimiento RPAS	2	2	3	1	**8**	Media

Fuente: *Elaboración propia a partir del análisis causal y los criterios de priorización desarrollados en la sección 3.4.6.*

Nota: *Los puntajes constituyen una valoración multicriterio cualitativa sustentada en la evidencia recopilada y en el alcance de la investigación. No representan probabilidades, frecuencias estadísticas ni mediciones del mercado nacional. La menor puntuación relativa de la dimensión normativa no implica menor importancia regulatoria, sino una menor capacidad de ser resuelta directamente mediante una intervención formativa.*

La priorización muestra que los factores de mayor atención para una eventual respuesta académica corresponden a la complejidad técnica de los RPAS, la documentación y trazabilidad y la especialización formativa. Estos elementos presentan una combinación de evidencia recurrente, relevancia para el mantenimiento profesionalizado y capacidad de ser abordados directamente mediante formación.

Los procedimientos de fabricante y la diversidad de responsabilidades de mantenimiento mantienen también una relevancia significativa, pero actúan principalmente como factores transversales que deben integrarse en el diseño de competencias, límites de intervención y criterios de derivación. Por su parte, la menor especificidad normativa constituye un elemento contextual relevante, aunque una propuesta académica no puede resolver mediante formación la estructura regulatoria existente; sí puede preparar a sus participantes para comprenderla y actuar dentro de sus límites.

La priorización no determina todavía la modalidad académica a implementar. Su función es establecer qué necesidades deben recibir mayor atención al comparar las distintas alternativas formativas. En consecuencia, la etapa siguiente evalúa posibles mecanismos de incorporación académica considerando las brechas priorizadas, el público objetivo, la profundidad técnica requerida, las capacidades institucionales de la USM y las condiciones preliminares de implementación.

3.5 Propuesta de curso de especialización o educación continua en mantenimiento de RPAS/drones

A partir del diagnóstico normativo, técnico, documental y formativo desarrollado en las secciones anteriores, y considerando las brechas priorizadas, se propone un curso de educación continua con enfoque de especialización técnica en mantenimiento de RPAS/drones. La selección de esta modalidad surge de la comparación entre distintas alternativas de incorporación formativa y de su coherencia con la evidencia recopilada, las capacidades académicas existentes y el alcance de la presente memoria.

La propuesta se plantea como una alternativa complementaria orientada a desarrollar competencias específicas en mantenimiento de RPAS/drones desde una perspectiva técnica, documental y de seguridad operacional. No pretende sustituir una formación técnica o profesional de base ni modificar directamente un plan de estudios vigente. Asimismo, TUMA se utiliza como una referencia curricular institucional para identificar capacidades transferibles, sin limitar el público objetivo exclusivamente a sus estudiantes, egresados o titulados.

Para efectos de esta memoria, el concepto de educación continua corresponde a una modalidad formativa complementaria destinada a actualizar, profundizar o especializar conocimientos fuera de una carrera regular. El enfoque de especialización técnica se relaciona con la profundización de competencias aplicadas a RPAS/drones en áreas como sistemas eléctricos y electrónicos, propulsión, baterías, navegación, comunicaciones, sensores, software, firmware, procedimientos de fabricante, diagnóstico, documentación técnica, trazabilidad y seguridad operacional.

La selección de la modalidad no determina todavía una duración, matrícula, precio o número definitivo de versiones. Estas variables se someten posteriormente a una evaluación técnico-económica mediante escenarios, con el propósito de establecer una configuración preliminar de implementación coherente con las restricciones académicas, operacionales y financieras consideradas en la investigación.

3.5.1 Evaluación de alternativas y fundamentación de la propuesta.

La selección de la alternativa formativa se sustenta en la relación entre las brechas identificadas, su priorización y la necesidad de proponer una respuesta proporcional al alcance de la investigación. Los antecedentes analizados muestran que la operación profesional de RPAS dispone de mecanismos formales asociados a operación, autorización, registro, certificación y trabajos aéreos, mientras que el mantenimiento técnico específico presenta un menor grado de formalización explícita dentro del marco normativo directamente asociado a estos sistemas (DGAC, 2023b, 2024a, 2025b, 2026a, 2026d).

El levantamiento institucional complementa este diagnóstico mediante casos concretos de utilización profesional y pública de RPAS. Los antecedentes muestran distintos esquemas de mantenimiento, desde intervenciones básicas realizadas por operadores hasta derivación a proveedores o servicios técnicos especializados, junto con diferencias en registros, trazabilidad, capacitación y procedimientos internos. Las áreas técnicas observadas comprenden baterías, motores, hélices, sensores, sistemas de navegación y comunicaciones, software, firmware, calibraciones, inspecciones y documentación técnica (Servicio Agrícola y Ganadero, 2026; Dirección de Vialidad, 2026; Corporación Nacional Forestal, 2022, 2026; Ilustre Municipalidad de Santiago, 2026).

La entrevista exploratoria con un representante de la DGAC aportó además un antecedente cualitativo respecto de una posible evolución del sector. Durante la conversación se planteó como hipótesis que, a medida que aumenten la complejidad de los equipos, los usos profesionales y las exigencias asociadas a seguridad operacional, podría producirse una mayor diferenciación entre funciones de operación, mantenimiento y gestión técnica

(representante DGAC, comunicación personal, 6 de julio de 2026). Este antecedente no determina por sí mismo la modalidad académica seleccionada, pero contribuye a sustentar la pertinencia de evaluar una formación especializada y adaptable a una eventual mayor profesionalización del sector.

Desde la perspectiva académica, TUMA proporciona una referencia institucional relevante debido a la existencia de capacidades relacionadas con mantenimiento aeronáutico, electricidad, electrónica, sistemas digitales, microprocesadores, aviónica, gestión del mantenimiento y seguridad operacional (USM, s. f.-b). El análisis de brechas mostró, sin embargo, que varias de estas capacidades requieren adaptación o profundización para su aplicación específica a tecnologías y procedimientos de RPAS/drones. Esta situación favorece una alternativa complementaria que pueda aprovechar capacidades existentes sin requerir necesariamente la creación de una nueva carrera o la modificación inmediata de una malla curricular formal.

Los antecedentes de capacitación privada aportan un elemento adicional de comparación. La Academia de Drones de Chile y Geoactivos ofrecen programas relacionados con mantenimiento preventivo, diagnóstico, motores, sensores, baterías, electrónica, software, firmware, calibración, telemetría y reparación de drones (Academia de Drones de Chile, s. f.-a, s. f.-b; Geoactivos, s. f.). Estas ofertas evidencian que el mantenimiento de drones ya es abordado como materia de capacitación técnica en Chile, pero no permiten inferir por sí solas la magnitud de la demanda, la disposición a pagar ni la cantidad de participantes potenciales de una oferta universitaria. Asimismo, presentan alcances y duraciones distintas de la alternativa evaluada en esta memoria, por lo que se utilizan como referencias comparativas y no como programas equivalentes.

Durante el desarrollo de la memoria, las alternativas posibles fueron además revisadas de manera iterativa con el profesor guía, principalmente con el propósito de delimitar el alcance académico del trabajo y evitar soluciones desproporcionadas respecto de la evidencia disponible y de las posibilidades de implementación analizadas. Esta revisión permitió ir descartando o postergando opciones de mayor alcance institucional. La justificación final de

la alternativa seleccionada, sin embargo, se fundamenta en los resultados del diagnóstico, las brechas priorizadas y los criterios comparativos desarrollados en la investigación.

Para comparar las alternativas se consideran como criterios principales la capacidad de responder a las brechas priorizadas, el nivel de profundidad técnica alcanzable, la flexibilidad respecto del público objetivo, el aprovechamiento de capacidades académicas existentes, la magnitud de los cambios institucionales requeridos, el tiempo y recursos necesarios para su implementación y la posibilidad de evaluar preliminarmente su factibilidad mediante el modelo técnico-económico desarrollado en esta memoria.

Tabla 3-12: *Evaluación comparativa de alternativas formativas y justificación de la modalidad seleccionada.*

Alternativa evaluada	Ventajas	Limitaciones	Evaluación para esta memoria
Nueva carrera técnica	Permitiría desarrollar una formación extensa, integrada y formal específicamente orientada a RPAS/drones.	Requiere diseño curricular completo, aprobación institucional, estructura docente y operacional propia, inversión, tiempo de implementación y evidencia de demanda suficiente para justificar una nueva oferta regular.	**No seleccionada.** Su alcance excede la evidencia disponible y los objetivos de esta memoria. Podría constituir una alternativa futura si el sector alcanza un nivel de desarrollo y demanda que la justifique.
Modificación directa de la carrera TUMA	Permitiría incorporar contenidos RPAS dentro de una formación aeronáutica existente y aprovechar capacidades académicas instaladas.	Implica intervenir formalmente un plan de estudios vigente y someter los cambios a procesos institucionales de revisión y aprobación. Además, restringiría inicialmente el alcance a estudiantes de una carrera específica.	**No seleccionada como alternativa principal.** TUMA se utiliza como referencia curricular y fuente de capacidades transferibles, sin proponer una modificación directa de su plan de estudios.
Diplomado	Permitiría una mayor profundidad, extensión y articulación de contenidos técnicos, documentales y de gestión.	Exige una estructura académica de mayor duración, más recursos docentes y operacionales y una validación de mercado más robusta. La presente investigación no dispone de un estudio formal de demanda que justifique inicialmente esta escala.	**No seleccionado para una primera implementación.** Puede considerarse como evolución futura de la propuesta si existe evidencia suficiente de participación, continuidad y necesidad de mayor profundidad.
Curso breve de capacitación técnica	Presenta menor duración, menor complejidad de implementación y permite desarrollar habilidades puntuales.	Puede resultar insuficiente para integrar de manera sistemática las brechas técnicas, documentales, de seguridad operacional y procedimientos de fabricante identificados como prioritarios.	**No seleccionado como modelo principal.** Se utiliza como referencia comparativa respecto de la oferta privada existente.
Curso de educación continua con enfoque de especialización técnica	Permite complementar capacidades previas, abordar las brechas priorizadas, aceptar perfiles técnicos o profesionales afines, estructurarse modularmente y aprovechar capacidades académicas existentes. Su escala facilita además una implementación inicial y posterior evaluación.	Requiere definir perfil de ingreso, resultados de aprendizaje, duración, recursos docentes, infraestructura, equipamiento, capacidad práctica y condiciones económico-financieras. No constituye por sí mismo una licencia o habilitación aeronáutica.	**Alternativa seleccionada.** Presenta el mejor equilibrio entre profundidad técnica, flexibilidad, alcance institucional y factibilidad preliminar para los objetivos de esta memoria.

Fuente: *Elaboración propia a partir de las brechas priorizadas y los criterios de selección descritos en la sección 3.5.1.*

La comparación muestra que las alternativas de mayor escala, como una nueva carrera o un diplomado, requieren niveles de validación institucional, recursos y evidencia de demanda superiores a los disponibles en esta etapa. Por otra parte, un curso técnico de muy corta duración podría resultar insuficiente para abordar de manera integrada las brechas técnicas, documentales y formativas priorizadas. La modificación directa de TUMA tampoco resulta necesaria para realizar una primera aproximación, dado que la propuesta busca mantener un público potencial más amplio y evitar intervenir formalmente una carrera vigente.

El curso de educación continua con enfoque de especialización técnica se selecciona, por tanto, como una alternativa intermedia y escalable. Su principal ventaja consiste en permitir una primera implementación con un alcance delimitado, aprovechar capacidades académicas existentes, incorporar participantes provenientes de distintos perfiles técnicos y profesionales y evaluar posteriormente sus resultados antes de considerar modalidades de mayor alcance.

La selección de esta modalidad tampoco implica que todos los contenidos identificados deban incorporarse con igual profundidad. La estructura curricular se deriva de las brechas priorizadas y debe mantener coherencia entre resultados de aprendizaje, contenidos, actividades prácticas, evaluación y recursos disponibles. Asimismo, la duración y configuración final deben ser contrastadas posteriormente mediante el modelo técnico-económico, donde se evalúan escenarios alternativos de horas formativas, capacidad, costos y condiciones de implementación.

En consecuencia, la propuesta de educación continua se utiliza como una primera estrategia de incorporación formativa, no como una solución definitiva o irreversible. Su implementación permitiría generar experiencia académica, técnica y operacional sobre la formación en mantenimiento RPAS/drones y producir antecedentes que, en una etapa posterior, podrían respaldar decisiones respecto de ampliación, articulación curricular o desarrollo de programas de mayor extensión.

3.5.2 Nombre propuesto del curso

Considerando las brechas priorizadas en las dimensiones técnica, documental y formativa, junto con los factores transversales asociados a normativa, procedimientos de fabricante y seguridad operacional, se propone denominar la alternativa:

“Mantenimiento técnico de RPAS/drones: sistemas, diagnóstico, documentación y seguridad operacional”

La denominación busca reflejar el carácter aplicado y multidisciplinario de la propuesta. La expresión “mantenimiento técnico” permite diferenciar el curso de una capacitación orientada principalmente a operación o pilotaje de drones, mientras que el uso conjunto de “RPAS/drones” mantiene coherencia con la terminología aeronáutica utilizada en el marco normativo y facilita, al mismo tiempo, su comprensión por participantes provenientes de distintos ámbitos técnicos.

Los conceptos “sistemas”, “diagnóstico”, “documentación” y “seguridad operacional” derivan directamente de las brechas identificadas. El término sistemas reconoce que los RPAS integran componentes eléctricos, electrónicos y digitales, además de propulsión, baterías, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware y cargas útiles. El diagnóstico incorpora la identificación de anomalías, interpretación de alertas, evaluación de componentes y aplicación de criterios de intervención o derivación. La documentación considera registros de inspección, mantenimiento, fallas, baterías, actualizaciones y trazabilidad de las intervenciones. Finalmente, la seguridad operacional vincula la condición técnica del sistema con su utilización segura en contextos profesionales e institucionales.

El nombre propuesto no se asocia a una marca, modelo o proveedor particular, en coherencia con el propósito de desarrollar competencias transferibles y adaptables a diferentes plataformas. Asimismo, no incorpora expresiones como “certificado”, “licencia” o “habilitación”, debido a que el curso propuesto no pretende otorgar atribuciones aeronáuticas oficiales ni sustituir requisitos que correspondan a la autoridad aeronáutica.

3.5.3 Objetivo general del curso

El objetivo general propuesto es:

Desarrollar competencias técnicas, documentales y de seguridad operacional para inspeccionar, diagnosticar y gestionar actividades de mantenimiento de RPAS/drones dentro de un alcance técnico definido, aplicando criterios de funcionamiento de sistemas eléctricos y electrónicos, propulsión, baterías, navegación, comunicaciones, sensores, software y firmware, junto con procedimientos de fabricante, documentación técnica, trazabilidad y criterios de intervención o derivación.

La formulación responde directamente a las brechas priorizadas durante la investigación. El objetivo no se limita a actividades elementales de limpieza o inspección visual, sino que incorpora comprensión sistémica del RPAS, diagnóstico técnico, interpretación de documentación, aplicación de procedimientos, registro de intervenciones y toma de decisiones respecto de los límites de mantenimiento o la necesidad de derivación a un servicio especializado.

Al mismo tiempo, el objetivo delimita el alcance del curso mediante la expresión “dentro de un alcance técnico definido”. Esto evita interpretar la formación propuesta como una autorización para intervenir cualquier plataforma, componente o sistema independientemente de las instrucciones del fabricante, competencias del participante o restricciones aplicables.

La propuesta mantiene así un nivel compatible con educación continua especializada. No pretende sustituir una formación técnica o profesional de base, crear una nueva profesión ni otorgar una habilitación oficial de mantenedor de RPAS, sino complementar capacidades previas mediante su aplicación específica a sistemas no tripulados.

3.5.4 Perfil de ingreso del curso

El curso se orienta a personas que dispongan de una base técnica previa o experiencia pertinente en ámbitos relacionados con mantenimiento, aeronáutica, electricidad, electrónica, telecomunicaciones, sistemas digitales, automatización u operación profesional de RPAS. Debido al nivel de especialización propuesto, no se plantea como un curso introductorio destinado exclusivamente a usuarios recreativos, sino como una formación complementaria para participantes capaces de abordar contenidos técnicos de diagnóstico, documentación, sistemas y seguridad operacional.

La carrera Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico (TUMA) de la Universidad Técnica Federico Santa María constituye un perfil institucional de referencia para la propuesta debido a que su formación incorpora capacidades relacionadas con mantenimiento, electricidad, electrónica, sistemas digitales, aviónica, gestión del mantenimiento y seguridad operacional (USM, s. f.-b). Sin embargo, esto no implica restringir el ingreso a estudiantes, egresados o titulados de dicha carrera.

También se consideran pertinentes técnicos y profesionales provenientes de áreas como electricidad, electrónica, telecomunicaciones, automatización, mantenimiento industrial, mecánica, informática aplicada y otras disciplinas compatibles con los contenidos técnicos del curso. Asimismo, pueden incorporarse operadores de RPAS o personal perteneciente a organizaciones que utilicen estos sistemas en actividades de inspección, infraestructura, minería, agricultura, seguridad, monitoreo territorial u otras aplicaciones profesionales, siempre que dispongan de una base suficiente para seguir los contenidos especializados.

Como condición recomendada de ingreso se considera disponer de conocimientos básicos de electricidad y electrónica, lectura e interpretación de documentación técnica, utilización de herramientas digitales y principios generales de operación o mantenimiento de equipos tecnológicos. La experiencia previa con RPAS constituye un antecedente favorable, pero no necesariamente obligatorio, dado que la estructura del curso puede incorporar una nivelación

inicial destinada a introducir arquitectura general del sistema, terminología RPAS, seguridad operacional y límites de intervención.

No se establece como requisito general disponer de credencial de piloto a distancia, debido a que la propuesta no corresponde a un curso de pilotaje ni tiene como objetivo habilitar operacionalmente a sus participantes. Cualquier actividad práctica que involucre operación de vuelo deberá ejecutarse bajo las condiciones y responsabilidades que correspondan al contexto académico y normativo aplicable.

Tabla 3-13: *Perfil de ingreso propuesto para el curso.*

Categoría de participante	**Relación con el curso**	**Condición de ingreso recomendada**
Estudiantes, egresados o titulados de TUMA USM	Presentan una base directamente relacionada con mantenimiento aeronáutico, sistemas eléctricos y electrónicos, aviónica, gestión del mantenimiento y seguridad operacional.	Formación técnica aeronáutica en curso o finalizada, según las condiciones académicas que defina la unidad responsable.
Técnicos o profesionales de electricidad, electrónica, telecomunicaciones, automatización, mantenimiento u otras áreas afines	Pueden aportar conocimientos aplicables a sistemas eléctricos, electrónicos, sensores, baterías, comunicaciones, diagnóstico y sistemas digitales.	Conocimientos técnicos básicos en alguna de las áreas indicadas y capacidad para interpretar documentación técnica.
Operadores RPAS/drones con experiencia profesional	Pueden requerir profundización en inspección, condición técnica, documentación, trazabilidad y criterios de mantenimiento o derivación.	Experiencia previa con RPAS y conocimientos básicos de operación segura y normativa aplicable.
Personal de instituciones o empresas usuarias de RPAS/drones	Permite vincular la formación con necesidades reales de disponibilidad, inspección, mantenimiento, documentación y gestión técnica de equipos.	Desempeño en funciones relacionadas con operación, inspección, mantenimiento, soporte técnico o gestión de RPAS y base técnica compatible con el curso.
Personas de otras áreas técnicas afines	Pueden incorporarse cuando su formación previa permita abordar adecuadamente los contenidos especializados.	Conocimientos básicos de electricidad, electrónica, mantenimiento, sistemas digitales, automatización o tecnologías equivalentes.

Fuente: *Elaboración propia a partir de la formación TUMA (USM, s. f.-b) y las brechas identificadas en la sección 3.4.*

3.5.5 Perfil de egreso del curso

Al finalizar el curso, se espera que el participante disponga de competencias complementarias para comprender la arquitectura general de un RPAS/drone, evaluar preliminarmente su condición técnica, aplicar criterios de inspección y diagnóstico inicial, interpretar documentación y procedimientos de fabricante, registrar intervenciones y relacionar la condición del sistema con la seguridad operacional.

El perfil de egreso propuesto corresponde a una formación de educación continua y no a una habilitación aeronáutica formal. Por lo tanto, el participante no egresa como "mantenedor de RPAS/drones" certificado por la Dirección General de Aeronáutica Civil ni como representante técnico autorizado de un fabricante. La propuesta busca desarrollar capacidades técnicas transferibles para apoyar actividades de inspección, diagnóstico, documentación, trazabilidad, mantenimiento dentro de un alcance definido y toma de decisiones respecto de intervención o derivación.

Desde una perspectiva sistémica, el participante deberá comprender que un RPAS no corresponde únicamente a la aeronave, sino a un conjunto integrado de componentes que incluye estación de pilotaje remoto, enlaces de comunicación, estructura, sistemas de propulsión y energía, sensores, navegación, software, firmware y cargas útiles. Esta comprensión permite interpretar la interacción entre distintos subsistemas y reconocer cómo una anomalía en alguno de ellos puede afectar el comportamiento general del equipo (ICAO, 2015, 2017; DJI, 2024).

En materia de inspección y diagnóstico, el participante deberá ser capaz de aplicar criterios técnicos para identificar condiciones anómalas, daños visibles, alertas, degradación de componentes y posibles fallas asociadas a baterías, motores, hélices, sensores, navegación, comunicaciones, software y firmware. Estas capacidades no implican autorización para ejecutar cualquier intervención, sino la aptitud para distinguir entre actividades dentro del alcance definido, necesidades de diagnóstico adicional y situaciones que requieren derivación a un servicio técnico especializado.

Respecto de procedimientos de fabricante, el participante deberá ser capaz de localizar, interpretar y utilizar documentación técnica pública, instrucciones, advertencias, límites de intervención, herramientas de configuración, alertas de sistema y criterios de calibración o actualización. Esta competencia resulta particularmente relevante debido a que las características técnicas, compatibilidades y procedimientos pueden variar entre plataformas, fabricantes y versiones de software o firmware (AESA, 2022; DJI, 2024; DJI, s. f.; DJI Enterprise, s. f.).

En la dimensión documental, el egresado deberá ser capaz de elaborar y mantener registros básicos de inspecciones, anomalías, fallas, intervenciones, reparaciones, baterías, actualizaciones, calibraciones y pruebas funcionales. Esta competencia responde a la heterogeneidad documental observada durante el levantamiento, donde se identificaron diferencias entre instituciones respecto de bitácoras, listas de verificación, historial de fallas y registros de mantenimiento (Servicio Agrícola y Ganadero, 2026; Dirección de Vialidad, 2026; Corporación Nacional Forestal, 2022, 2026; Ilustre Municipalidad de Santiago, 2026).

La seguridad operacional constituye un criterio transversal al perfil de egreso. El participante deberá relacionar la condición técnica del RPAS con aspectos como estado de baterías, sensores, navegación, comunicaciones, pérdida o degradación de señal, configuración, software, firmware y respuesta frente a comportamientos anormales. El propósito es incorporar criterios preventivos a la evaluación técnica del equipo y a la decisión de mantenerlo en operación, intervenirlo o derivarlo.

Finalmente, se espera que el participante pueda integrar estas capacidades en situaciones aplicadas, utilizando información técnica para identificar una condición, documentarla y proponer una acción coherente con el alcance disponible. Esta capacidad integradora busca evitar una formación limitada al reconocimiento de componentes y favorecer una aproximación sistemática al mantenimiento profesionalizado de RPAS/drones.

***Tabla 3-14**: Perfil de egreso propuesto para el curso.*

Dimensión del perfil de egreso	Resultado esperado	Evidencia de logro esperada
Comprensión sistémica del RPAS/drone	Reconoce el RPAS como un sistema integrado compuesto por aeronave, estación de pilotaje remoto, enlaces de comunicación, sistemas eléctricos y electrónicos, sensores, navegación, software, firmware, baterías y cargas útiles.	Identifica los principales subsistemas y explica su función e interacción dentro del funcionamiento general del RPAS.
Inspección técnica	Aplica criterios de inspección previa y posterior para evaluar estructura, hélices, motores, baterías, sensores, cámaras, gimbal, navegación, comunicaciones y alertas del sistema.	Completa una pauta de inspección técnica e identifica condiciones que requieren seguimiento, corrección o derivación.
Diagnóstico inicial	Reconoce fallas frecuentes, alertas, síntomas y posibles causas asociadas a componentes eléctricos, electrónicos, digitales, navegación, comunicaciones o software.	Analiza un caso de falla y propone una acción inicial técnicamente fundamentada.
Procedimientos de fabricante	Interpreta documentación pública, instrucciones, advertencias, límites de intervención, configuraciones, actualizaciones y criterios de calibración aplicables a una plataforma.	Analiza un procedimiento técnico y determina qué acciones se encuentran dentro del alcance disponible y cuáles requieren derivación.
Documentación y trazabilidad	Registra inspecciones, fallas, intervenciones, reparaciones, baterías, actualizaciones, calibraciones y pruebas funcionales.	Elabora un registro técnico o bitácora de mantenimiento para un caso aplicado.
Seguridad operacional	Relaciona la condición técnica del RPAS con la operación segura, considerando baterías, sensores, navegación, comunicaciones, configuración, pérdida de señal y comportamiento anormal del sistema.	Evalúa riesgos técnicos de una situación aplicada y propone medidas preventivas o correctivas desde la perspectiva del mantenimiento.
Criterio de intervención o derivación	Distingue entre actividades básicas, revisión técnica especializada y situaciones que requieren soporte externo o servicio técnico especializado.	Clasifica casos de intervención según su nivel de complejidad y justifica técnicamente la decisión adoptada.
Aplicación profesional	Integra criterios técnicos, documentales y de seguridad operacional para apoyar la gestión de mantenimiento de RPAS utilizados en contextos profesionales, institucionales o industriales.	Resuelve un caso integrador que combine inspección, diagnóstico, documentación, procedimiento de fabricante, trazabilidad y decisión de intervención o derivación.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de las competencias y brechas identificadas y priorizadas en la sección 3.4.*

***Nota:** El perfil de egreso propuesto define competencias formativas complementarias y no reemplaza certificaciones, licencias, autorizaciones, requisitos establecidos por la autoridad aeronáutica ni habilitaciones otorgadas por fabricantes. El alcance de las intervenciones debe adecuarse a la documentación técnica aplicable, las competencias disponibles y las condiciones definidas para cada plataforma.*

3.5.6 Estructura general del curso

La estructura general del curso se deriva de las brechas técnicas, documentales y formativas priorizadas, considerando además como criterios transversales el marco normativo, los procedimientos de fabricante y la seguridad operacional. A partir de estos antecedentes, se plantea un curso de educación continua con enfoque de especialización técnica orientado al mantenimiento de RPAS/drones utilizados en contextos profesionales, institucionales e industriales.

La denominación preliminar de la propuesta corresponde a *Mantenimiento técnico de RPAS/drones: sistemas, diagnóstico, documentación y seguridad operacional*. Su propósito es complementar capacidades técnicas previas mediante una formación aplicada que integre comprensión sistémica del RPAS, inspección, diagnóstico inicial, mantenimiento dentro de un alcance definido, documentación técnica, trazabilidad, interpretación de procedimientos de fabricante y criterios de seguridad operacional.

La estructura busca diferenciarse de las ofertas privadas breves identificadas durante el levantamiento, no por asumir una superioridad académica a priori, sino por integrar en una misma propuesta dimensiones que en los antecedentes revisados aparecen con distintos niveles de profundidad: fundamentos técnicos, arquitectura RPAS, sistemas eléctricos y electrónicos, propulsión y baterías, sensores, navegación, comunicaciones, software y firmware, procedimientos de fabricante, documentación, trazabilidad y seguridad operacional (Academia de Drones de Chile, s. f.-a, s. f.-b; Geoactivos, s. f.).

Para evaluar la duración del curso se consideran cuatro escenarios de 24, 40, 60 y 80 horas cronológicas. Estos escenarios no representan estimaciones de demanda ni configuraciones previamente aprobadas por la USM, sino alternativas de diseño utilizadas para analizar el efecto de diferentes niveles de profundidad sobre la cobertura curricular, las actividades prácticas, los recursos docentes, la infraestructura, el equipamiento y los costos de implementación.

La comparación entre escenarios se realiza en dos etapas. En primer lugar, cada alternativa debe cumplir un nivel mínimo de suficiencia formativa respecto de los contenidos y resultados de aprendizaje definidos para el curso. Una alternativa que no permita desarrollar adecuadamente las competencias consideradas esenciales no debe seleccionarse únicamente por presentar un menor costo. En segundo lugar, las alternativas que resulten curricular y técnicamente viables se comparan mediante el modelo técnico-económico desarrollado posteriormente, considerando sus requerimientos de recursos y resultados económico-financieros. De esta forma, la decisión final integra criterios formativos y de factibilidad de implementación.

La modalidad propuesta es teórico-práctica. Las actividades conceptuales se orientan a desarrollar fundamentos normativos, técnicos, documentales y de seguridad operacional, mientras que las actividades prácticas y aplicadas permiten utilizar dichos conocimientos mediante inspección, diagnóstico, revisión de componentes, análisis de alertas y fallas, interpretación de documentación técnica, elaboración de registros y resolución de casos.

La distribución entre horas conceptuales y prácticas no se establece mediante un porcentaje fijo aplicable a todos los módulos. En cambio, se determina según la naturaleza de los resultados de aprendizaje y las actividades requeridas para alcanzarlos. Esta decisión permite asignar mayor carga práctica a módulos asociados con inspección, diagnóstico, sistemas eléctricos, baterías, sensores o documentación aplicada, mientras que contenidos normativos o conceptuales pueden requerir una proporción distinta.

Las actividades prácticas pueden incluir inspección de componentes y sistemas, verificación de estructura y propulsión, evaluación de baterías, utilización de instrumental básico, interpretación de telemetría y alertas, revisión de sensores y sistemas de navegación, análisis de software y firmware, interpretación de procedimientos de fabricante, elaboración de registros técnicos y resolución de casos de falla. El alcance de estas actividades debe mantenerse dentro de condiciones controladas y coherentes con las competencias del curso y con los límites establecidos para cada plataforma.

Para el desarrollo práctico se considera el uso combinado de una plataforma RPAS de carácter industrial como sistema de referencia y de componentes, bancos didácticos, herramientas e instrumental complementario. Este enfoque permite estudiar la integración real de un RPAS profesional sin utilizar permanentemente el equipo completo como banco de desmontaje y, al mismo tiempo, facilita el desarrollo de actividades sobre motores, controladores, baterías, sensores, conectores y otros componentes. Asimismo, reduce la dependencia de una única plataforma para todas las actividades prácticas.

El público objetivo comprende técnicos, profesionales, estudiantes, egresados o titulados que dispongan de una base compatible con los contenidos del curso. TUMA constituye una referencia curricular institucional relevante por las capacidades existentes en mantenimiento, electricidad, electrónica, aviónica, sistemas digitales, gestión del mantenimiento y seguridad operacional, pero no corresponde al único perfil de ingreso posible. También pueden considerarse participantes provenientes de electricidad, electrónica, telecomunicaciones, automatización, mantenimiento, operación profesional de RPAS y otras áreas afines, de acuerdo con los requisitos de ingreso definidos previamente.

El alcance técnico del curso se concentra en inspección, diagnóstico inicial, mantenimiento preventivo dentro de límites definidos, documentación, trazabilidad, verificación funcional y toma de decisiones respecto de intervención o derivación. La propuesta no supone que todos los componentes puedan ser reparados directamente por el participante, especialmente cuando existan restricciones de fabricante, sistemas propietarios, intervenciones de mayor complejidad o requerimientos de soporte especializado.

La propuesta tampoco constituye una licencia, habilitación o certificación aeronáutica de mantenedor de RPAS. En caso de que posteriormente la USM evalúe mecanismos de reconocimiento, articulación o vinculación con organismos externos, estos deberán desarrollarse mediante los procesos institucionales y regulatorios que correspondan y no forman parte de la implementación inicial evaluada en esta memoria.

***Tabla 3-15**:Estructura general propuesta para el curso.*

Elemento	Definición propuesta
Nombre del curso	*Mantenimiento técnico de RPAS/drones: sistemas, diagnóstico, documentación y seguridad operacional*.
Modalidad formativa	Curso de educación continua con enfoque de especialización técnica.
Duración	Evaluación mediante escenarios de 24, 40, 60 y 80 horas cronológicas. La selección definitiva requiere cumplir primero criterios de suficiencia formativa y posteriormente criterios de factibilidad técnico-económica.
Distribución horaria	Combinación de actividades conceptuales, aplicadas y prácticas, variable según los resultados de aprendizaje y contenidos de cada módulo.
Componente práctico	Determinado por las competencias y actividades requeridas en cada módulo, sin establecer un porcentaje mínimo uniforme para todo el curso.
Público objetivo	Técnicos, profesionales, estudiantes, egresados o titulados con formación o experiencia compatible en mantenimiento, aeronáutica, electricidad, electrónica, telecomunicaciones, automatización, sistemas digitales, operación profesional de RPAS u otras áreas afines.
Requisitos recomendados	Conocimientos técnicos básicos en mantenimiento, electricidad, electrónica, lectura técnica, sistemas digitales o áreas equivalentes. La experiencia previa con RPAS es deseable, pero no necesariamente obligatoria.
Enfoque principal	Comprensión sistémica, inspección, diagnóstico, mantenimiento preventivo dentro de un alcance definido, documentación, trazabilidad, procedimientos de fabricante, criterios de intervención o derivación y seguridad operacional.
Actividades prácticas sugeridas	Inspección de componentes, evaluación de baterías y sistemas de propulsión, revisión de sistemas eléctricos y electrónicos, interpretación de alertas y telemetría, análisis de sensores, navegación, software y firmware, elaboración de registros y resolución de casos técnicos.
Recursos formativos	Plataforma RPAS industrial de referencia, componentes y bancos didácticos, instrumental, herramientas, documentación técnica pública y recursos digitales.
Evaluación propuesta	Evaluaciones parciales, actividades aplicadas y prácticas, elaboración de documentación técnica y actividad integradora final vinculada a un caso de mantenimiento.
Resultado esperado	Participante capaz de apoyar procesos de inspección, diagnóstico inicial, documentación, trazabilidad y gestión técnica de RPAS, reconociendo los límites de intervención y criterios de derivación.
Alcance de la propuesta	Formación complementaria. No constituye una licencia de mantenedor, habilitación aeronáutica ni autorización de fabricante.
Proyección institucional futura	Posibilidad de evaluar posteriormente articulación curricular, ampliación hacia programas de mayor extensión u otros mecanismos institucionales, en función de resultados, participación y antecedentes futuros.

***Fuente:** Elaboración propia a partir del perfil de egreso propuesto y las brechas priorizadas en la sección 3.4.*

***Nota:** Los escenarios de duración constituyen alternativas para la evaluación curricular y técnico-económica de la propuesta. No representan estimaciones de demanda, matrícula esperada ni una decisión institucional definitiva. La estructura deberá ser validada por la unidad académica correspondiente en caso de avanzar hacia una implementación real.*

La estructura definida constituye la base para desarrollar posteriormente la organización modular, los resultados de aprendizaje y las actividades de evaluación. A su vez, sus requerimientos de duración, horas docentes, componente práctico, infraestructura y equipamiento constituyen entradas para el modelo técnico-económico de puesta en marcha.

La selección final del escenario deberá mantener esta secuencia de decisión: primero se descartan aquellas alternativas que no alcancen una suficiencia curricular mínima y posteriormente se comparan económicamente las alternativas académicamente viables. De esta forma, el modelo financiero actúa como herramienta de apoyo a la decisión y no como sustituto del criterio académico.

3.5.7 Estructura modular y contenidos mínimos

La estructura modular del curso se deriva de las brechas técnicas, documentales y formativas priorizadas, considerando además como criterios transversales el marco normativo, los procedimientos de fabricante y la seguridad operacional. En consecuencia, los módulos no se organizan únicamente como una secuencia de contenidos técnicos, sino como una progresión formativa que avanza desde la comprensión del contexto normativo y de la arquitectura general de los RPAS/drones hacia actividades de inspección, diagnóstico, mantenimiento, documentación técnica y aplicación integrada de criterios de intervención o derivación.

Se propone una estructura compuesta por ocho módulos. Cada uno responde a uno o más de los requerimientos identificados durante el diagnóstico y contribuye progresivamente al desarrollo de las capacidades definidas en el perfil de egreso. Para efectos del diseño de esta memoria se asigna una carga horaria de referencia a cada módulo y una cantidad de horas prácticas o aplicadas cuando la naturaleza de los aprendizajes requiere este tipo de actividad.

La asignación horaria se realizó mediante un criterio de diseño curricular basado en cuatro elementos: amplitud y complejidad de los contenidos, necesidad de actividades prácticas o aplicadas, relevancia del módulo respecto del perfil de egreso y grado de integración con

aprendizajes desarrollados previamente. Por esta razón, la carga no se distribuye uniformemente entre los módulos. Aquellos de carácter principalmente conceptual o de contextualización reciben una menor cantidad de horas, mientras que los relacionados con sistemas técnicos, diagnóstico, mantenimiento y aplicación integradora concentran una mayor carga debido a su amplitud y necesidad de trabajo práctico.

La suma de las asignaciones realizadas módulo a módulo determina una carga total de 40 horas cronológicas para la cobertura completa del alcance curricular propuesto, de las cuales 21 horas corresponden a actividades prácticas o aplicadas. Esta duración constituye una referencia de diseño elaborada para la presente investigación y no corresponde a una exigencia normativa, una duración oficialmente aprobada por la USM ni un estándar externo para la formación en mantenimiento de RPAS/drones.

Los antecedentes de capacitación privada revisados se utilizan únicamente como referencia complementaria respecto de contenidos y niveles de profundidad existentes. Entre ellos se identificaron programas breves que incorporan electrónica, motores, sensores, baterías, software, diagnóstico, mantenimiento preventivo, reparación, telemetría y calibración (Academia de Drones de Chile, s. f.-a, s. f.-b; Geoactivos, s. f.). No obstante, dichas ofertas no se utilizan para determinar directamente la duración de esta propuesta, debido a que presentan alcances, propósitos y estructuras diferentes y no necesariamente incorporan con la misma profundidad las dimensiones normativa, documental, de trazabilidad y seguridad operacional consideradas en esta investigación.

La carga de 40 horas debe interpretarse, por tanto, como el resultado de la suma de las horas asignadas para cubrir los ocho módulos definidos y no como una afirmación de que toda formación especializada en mantenimiento RPAS deba poseer esa duración. Su función es establecer una referencia curricular interna que permita posteriormente comparar distintos escenarios de diseño e implementación.

Esta definición permite interpretar adecuadamente los escenarios de 24, 40, 60 y 80 horas utilizados en la evaluación posterior. Bajo las asignaciones establecidas en esta investigación,

el escenario de 24 horas no permite cubrir íntegramente los ocho módulos y el alcance formativo propuesto, por lo que se mantiene únicamente como alternativa de contraste. El escenario de 40 horas corresponde a la primera configuración que permite cubrir la estructura curricular completa definida, mientras que los escenarios de 60 y 80 horas permiten evaluar una mayor profundización de contenidos, actividades prácticas, resolución de casos y aplicación técnica.

En consecuencia, la evaluación técnico-económica posterior no puede seleccionar una alternativa únicamente por presentar menores costos o mejores indicadores financieros. Primero debe verificarse la cobertura del alcance curricular definido y, posteriormente, comparar las alternativas que resulten académicamente viables. De esta manera, el modelo económico se utiliza como herramienta de apoyo a la decisión y no como sustituto del criterio académico.

***Tabla 3-16**: Estructura modular propuesta y carga horaria de referencia.*

Módulo	Nombre del módulo	Horas de referencia	Horas prácticas o aplicadas de referencia	Enfoque principal	Brecha o criterio asociado
1	Marco normativo RPAS, mantenimiento y seguridad operacional	3	0	Normativa relevante, responsabilidades, alcance y límites del curso, relación entre condición técnica y operación segura.	Normativa y seguridad operacional
2	Arquitectura RPAS y límites de intervención	4	1	Arquitectura general del sistema, subsistemas principales, integración y reconocimiento de límites técnicos.	Técnica
3	Sistemas eléctricos, propulsión y baterías	6	3	Motores, controladores electrónicos de velocidad, distribución eléctrica, baterías, conectores y diagnóstico básico.	Técnica
4	Sensores, navegación, comunicaciones y cargas útiles	5	2	GNSS, RTK, IMU, sensores, navegación, comunicaciones, telemetría y cargas útiles.	Técnica y seguridad operacional
5	Software, firmware, telemetría y procedimientos de fabricante	4	2	Configuración, actualizaciones, alertas, telemetría, calibraciones, compatibilidad, documentación y límites de fabricante.	Técnica y procedimientos de fabricante
6	Documentación técnica y trazabilidad	4	2	Registros de inspección y mantenimiento, bitácoras, historial de fallas, baterías, actualizaciones, calibraciones y trazabilidad.	Documental
7	Diagnóstico y mantenimiento preventivo/correctivo	8	6	Inspección, diagnóstico, mantenimiento preventivo, identificación de fallas, sustitución de componentes dentro del alcance definido y criterios de derivación.	Técnica, documental y procedimientos de fabricante
8	Taller integrador de mantenimiento y criterios de intervención o derivación	6	5	Aplicación integrada de inspección, diagnóstico, documentación, seguridad operacional y decisión técnica.	Integración de brechas
Total de referencia		**40**	**21**		

***Fuente:** Elaboración propia a partir de los resultados del análisis de brechas y el diseño curricular desarrollado en la sección 3.5.*

***Nota:** Las horas indicadas corresponden a una asignación de diseño realizada para la presente propuesta, considerando amplitud y complejidad de contenidos, necesidad de actividades prácticas, relevancia respecto del perfil de egreso e integración de aprendizajes. No constituyen un estándar normativo ni una duración oficialmente aprobada por la USM. El escenario de 24 horas se utiliza como alternativa de contraste, pero no permite cubrir íntegramente la estructura de ocho módulos bajo las asignaciones definidas.*

El módulo 1 contextualiza el mantenimiento de RPAS dentro del marco normativo y de seguridad operacional. Su propósito no es formar pilotos a distancia ni sustituir credenciales

o autorizaciones operacionales, sino relacionar la condición técnica del equipo con la operación segura, las responsabilidades aplicables y los límites de intervención.

El módulo 2 introduce la arquitectura general del RPAS como sistema integrado. Se consideran la aeronave, la estación de pilotaje remoto, los sistemas de energía y propulsión, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware y cargas útiles, junto con la identificación de componentes o procedimientos cuya intervención puede encontrarse limitada por documentación de fabricante (ICAO, 2015, 2017).

Los módulos 3 y 4 profundizan en los principales sistemas técnicos. El módulo 3 aborda sistemas eléctricos, motores, controladores electrónicos de velocidad, baterías, distribución de energía, conectores y criterios básicos de diagnóstico. El módulo 4 se concentra en sensores, navegación, comunicaciones y cargas útiles, incluyendo sistemas de posicionamiento, unidades inerciales, sensores de visión, enlaces de mando y control, telemetría y transmisión de información.

El módulo 5 aborda la dimensión digital y los procedimientos de fabricante. Considera software, firmware, telemetría, configuraciones, alertas, actualizaciones, calibraciones, compatibilidad, herramientas de diagnóstico y documentación técnica. Su finalidad es desarrollar la capacidad de interpretar procedimientos aplicables sin restringir la formación a una marca o plataforma determinada (AESA, 2022; DJI, 2024).

El módulo 6 se concentra en documentación técnica y trazabilidad. Incluye bitácoras, listas de verificación, registros de inspección, historial de fallas, documentación de intervenciones, control de baterías, actualizaciones, calibraciones y pruebas funcionales. Este módulo responde directamente a la heterogeneidad documental identificada durante el levantamiento institucional.

El módulo 7 integra los conocimientos técnicos anteriores mediante actividades de diagnóstico y mantenimiento preventivo o correctivo dentro del alcance definido para el curso. Se consideran inspección, limpieza técnica, identificación y clasificación de fallas,

revisión de componentes, mantenimiento preventivo, sustitución de elementos cuando corresponda y criterios para decidir si una intervención puede realizarse dentro del alcance disponible o debe derivarse a un servicio técnico especializado.

Finalmente, el módulo 8 corresponde al taller integrador. Mediante un caso aplicado, el participante debe inspeccionar el equipo, analizar la condición técnica o falla planteada, consultar la documentación disponible, registrar los hallazgos, proponer acciones técnicamente justificadas y determinar si corresponde efectuar una intervención dentro del alcance definido o derivar el equipo.

***Tabla 3-17**: Contenidos mínimos propuestos por módulo.*

Módulo	Contenidos mínimos propuestos
1. Marco normativo RPAS, mantenimiento y seguridad operacional	Conceptos de RPA, RPAS y UAS; normativa chilena relevante; operación profesional; registro y credenciales cuando corresponda; responsabilidades; alcance y límites del curso; condición técnica y operación segura; principios de seguridad operacional.
2. Arquitectura RPAS y límites de intervención	Aeronave; estación de pilotaje remoto; estructura; sistemas de energía y propulsión; sensores; navegación; comunicaciones; antenas; cargas útiles; software y firmware; integración del sistema; componentes propietarios y límites de intervención.
3. Sistemas eléctricos, propulsión y baterías	Motores eléctricos; ESC; hélices; baterías; distribución de energía; conectores; cableado; inspección; fallas eléctricas frecuentes; riesgos asociados a baterías; criterios básicos de diagnóstico.
4. Sensores, navegación, comunicaciones y cargas útiles	GNSS; RTK; IMU; brújula o magnetómetro; sensores de visión; cámaras; gimbal; enlaces de mando y control; radio y video; telemetría; pérdida o degradación de señal; interferencias; cargas útiles técnicas.
5. Software, firmware, telemetría y procedimientos de fabricante	Aplicaciones y documentación pública de fabricante; herramientas de configuración y diagnóstico; firmware; actualizaciones; control de versiones; alertas; telemetría; calibraciones; compatibilidad; límites de intervención y criterios de derivación.
6. Documentación técnica y trazabilidad	Bitácoras; listas de verificación; registros de inspección; historial de fallas; registro de intervenciones; control de baterías; actualizaciones; calibraciones; pruebas funcionales; trazabilidad documental y respaldo de condición técnica.
7. Diagnóstico y mantenimiento preventivo/correctivo	Inspección previa y posterior; limpieza técnica; revisión de estructura, hélices, motores, sensores, baterías y conexiones; identificación y clasificación de fallas; mantenimiento preventivo; sustitución de componentes dentro del alcance definido; criterios de reparación o derivación.
8. Taller integrador de mantenimiento y criterios de intervención o derivación	Caso aplicado; inspección; diagnóstico; revisión de documentación técnica; elaboración de registro; análisis de seguridad operacional; propuesta de mantenimiento; decisión justificada respecto de intervención o derivación; presentación de informe técnico.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de los antecedentes técnicos y normativos del capítulo 2 y las brechas identificadas en la sección 3.4.*

***Nota:** Los contenidos se formulan con carácter transversal y no dependen de una marca o modelo específico de RPAS/drone. Cuando se utilicen plataformas, documentación o herramientas de fabricante como apoyo didáctico, estas se emplearán como casos de aplicación respetando sus instrucciones, compatibilidades y límites técnicos.*

La estructura modular mantiene una relación directa entre los resultados del diagnóstico y la propuesta académica. La dimensión normativa y de seguridad operacional se aborda principalmente en el módulo 1; la arquitectura y los sistemas técnicos se desarrollan en los módulos 2, 3 y 4; el componente digital y los procedimientos de fabricante se concentran en

el módulo 5; la documentación y trazabilidad en el módulo 6; y la integración de diagnóstico, mantenimiento y criterio técnico en los módulos 7 y 8.

Esta organización permite establecer trazabilidad entre las brechas priorizadas, el perfil de egreso y los contenidos curriculares propuestos. De este modo, la incorporación de contenidos responde a los requerimientos identificados durante el diagnóstico y no únicamente a una selección temática general.

A partir de la asignación horaria definida para cada módulo, la cobertura completa de la estructura propuesta alcanza 40 horas cronológicas, de las cuales 21 corresponden a actividades prácticas o aplicadas. Estos valores derivan del diseño curricular desarrollado en la investigación, considerando la amplitud de los contenidos, la necesidad de actividades prácticas, su relevancia respecto del perfil de egreso y el grado de integración requerido entre módulos. Por tanto, no corresponden a una exigencia normativa ni a un estándar externo de duración para programas de mantenimiento de RPAS/drones.

Sobre esta base, los escenarios de 24, 40, 60 y 80 horas permiten evaluar distintas configuraciones de implementación. El escenario de 24 horas representa una reducción respecto de la cobertura completa definida para la propuesta, mientras que las alternativas de 40, 60 y 80 horas permiten analizar configuraciones con distintos niveles de profundidad y desarrollo práctico. Estas alternativas serán contrastadas posteriormente mediante criterios curriculares, técnicos y económico-financieros.

3.5.8 Elementos diferenciadores de la propuesta formativa

La propuesta de curso de educación continua se estructura a partir de las brechas priorizadas durante la investigación y de los antecedentes de capacitación y servicios técnicos revisados. La diferenciación planteada no busca establecer una superioridad respecto de las ofertas privadas existentes, sino identificar características propias de la alternativa académica propuesta para la Universidad Técnica Federico Santa María.

Los antecedentes programáticos analizados muestran la existencia de cursos privados orientados al mantenimiento de drones, con contenidos relacionados con mantenimiento preventivo, electrónica, motores, sensores, baterías, diagnóstico de fallas, reparación, telemetría, calibración y utilización de herramientas de fabricante (Academia de Drones de Chile, s. f.-a, s. f.-b; Geoactivos, s. f.). Estos programas constituyen referencias pertinentes para identificar contenidos actualmente abordados en el ámbito de la capacitación técnica, aunque presentan alcances, duraciones y propósitos distintos a los definidos para la propuesta desarrollada en esta memoria.

En el contexto de la USM, la existencia de formación técnica asociada al mantenimiento aeronáutico proporciona capacidades académicas relacionadas con mantenimiento, sistemas eléctricos y electrónicos, aviónica, sistemas digitales, gestión del mantenimiento y seguridad operacional (USM, s. f.-b). TUMA se utiliza como referencia curricular institucional y como antecedente de capacidades existentes, sin asumir que constituya el único público objetivo ni que la implementación del curso implique modificar su plan de estudios.

El principal elemento diferenciador de la propuesta corresponde a la integración de dimensiones técnicas, documentales y de seguridad operacional dentro de una misma estructura formativa. El curso no se limita al reconocimiento de componentes o a la ejecución de procedimientos puntuales, sino que relaciona arquitectura RPAS, sistemas eléctricos y electrónicos, propulsión, baterías, navegación, comunicaciones, software, firmware, diagnóstico, documentación, procedimientos de fabricante, trazabilidad y criterios de intervención o derivación.

La documentación y trazabilidad constituyen otro elemento explícito del diseño. Se incorporan registros de inspección, historial de fallas, documentación de intervenciones, control de baterías, actualizaciones, calibraciones y pruebas funcionales. Estas actividades responden directamente a la heterogeneidad documental identificada durante el levantamiento institucional y buscan complementar el componente técnico con criterios de seguimiento de la condición del equipo.

La seguridad operacional se incorpora transversalmente. La evaluación técnica del RPAS se relaciona con las posibles consecuencias que una condición anómala puede tener sobre la operación, incluyendo fallas de componentes, degradación de baterías, sensores, navegación, comunicaciones, configuración y software o firmware. De esta manera, la seguridad operacional no se concentra únicamente en un módulo, sino que forma parte de los criterios utilizados durante inspección, diagnóstico, documentación y toma de decisiones.

Asimismo, los procedimientos y herramientas de fabricante se emplean como recursos de aplicación y no como eje comercial de la propuesta. El participante deberá aprender a interpretar documentación, alertas, configuraciones, compatibilidades y límites de intervención correspondientes a las plataformas utilizadas como referencia, manteniendo un enfoque transferible a distintos RPAS.

La evaluación constituye también un componente diferenciador del diseño. Además de verificar conocimientos conceptuales, se consideran actividades de inspección, interpretación de documentación, elaboración de registros técnicos y resolución de un caso integrador. Esto permite vincular los contenidos con desempeños observables relacionados con el perfil de egreso.

***Tabla 3-18**: Elementos diferenciadores de la propuesta formativa respecto de la oferta privada identificada.*

Elemento diferenciador	Oferta privada identificada	Propuesta USM
Duración y profundidad	Se identificaron programas acotados, incluyendo ofertas desarrolladas en una o dos jornadas, con alcances variables según cada programa.	La cobertura curricular completa propuesta alcanza 40 horas cronológicas como referencia interna de diseño. Los escenarios de 60 y 80 horas permiten evaluar mayor profundización, mientras que 24 horas se mantiene como escenario de contraste.
Enfoque formativo	Las ofertas revisadas se orientan principalmente a mantenimiento, diagnóstico, reparación, calibración y procedimientos técnicos específicos.	Integra arquitectura RPAS, sistemas técnicos, diagnóstico, documentación, procedimientos de fabricante, trazabilidad y seguridad operacional.
Contexto académico	Corresponde a capacitación técnica privada con características particulares según cada proveedor.	Curso de educación continua propuesto desde una universidad que dispone de capacidades académicas vinculadas al ámbito aeronáutico y técnico.
Documentación y trazabilidad	Presencia variable según los antecedentes programáticos revisados.	Incorporación explícita de registros de inspección, historial de fallas, baterías, actualizaciones, calibraciones e intervenciones técnicas.
Seguridad operacional	Puede incorporarse mediante recomendaciones, procedimientos o contenidos particulares del programa.	Se desarrolla transversalmente relacionando condición técnica, diagnóstico, límites de intervención y operación segura.
Procedimientos de fabricante	Utilización frecuente de herramientas, procedimientos o plataformas específicas.	Uso de documentación y herramientas de fabricante como casos de aplicación, evitando que el diseño curricular dependa exclusivamente de una marca o modelo.
Diagnóstico e intervención	Puede concentrarse en procedimientos de mantenimiento y reparación definidos por cada programa.	Incorpora diagnóstico, identificación de anomalías, límites de intervención y criterios de derivación técnica.
Evaluación	Depende de las características particulares de cada oferta.	Combina evaluación conceptual, actividades prácticas, documentación técnica y un caso integrador.
Proyección académica	Capacitación orientada a objetivos técnicos específicos definidos por cada entidad.	Alternativa de educación continua susceptible de actualización o eventual ampliación futura en función de resultados, evolución tecnológica y decisiones institucionales.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de la oferta privada citada en la sección 3.3.3 y del diseño curricular desarrollado en la sección 3.5.*

***Nota:** La comparación tiene un propósito descriptivo y se limita a los antecedentes disponibles durante el desarrollo de la investigación. No constituye una evaluación de calidad, certificación, resultados de aprendizaje ni desempeño de las ofertas privadas consideradas.*

En conjunto, el valor diferenciador de la propuesta se encuentra en la integración de dimensiones que pueden aparecer con distintos niveles de profundidad en las ofertas de capacitación analizadas. La combinación entre sistemas RPAS, diagnóstico, procedimientos de fabricante, documentación técnica, trazabilidad y seguridad operacional proporciona una estructura coherente con las brechas priorizadas durante la investigación.

La diferenciación planteada constituye además un antecedente para la evaluación de puesta en marcha. La mayor amplitud del diseño curricular implica requerimientos específicos de horas docentes, actividades prácticas, infraestructura, equipamiento y capacidad de laboratorio, los cuales se incorporan posteriormente al modelo técnico-económico.

3.5.9 Resultados de aprendizaje y evaluación del curso

Los resultados de aprendizaje se formulan a partir del perfil de egreso, la estructura modular y las brechas priorizadas durante la investigación. Su función es expresar desempeños observables que permitan verificar la comprensión y aplicación de criterios técnicos, documentales y de seguridad operacional vinculados con el mantenimiento de RPAS/drones.

La formulación sigue una progresión desde capacidades de contextualización y comprensión sistémica hacia desempeños de mayor aplicación e integración. Inicialmente se consideran la interpretación del marco normativo y la arquitectura de los RPAS; posteriormente se abordan sistemas técnicos, procedimientos de fabricante, documentación y diagnóstico; finalmente, estas capacidades se integran en la resolución de un caso aplicado.

Esta estructura busca mantener coherencia entre perfil de egreso, resultados de aprendizaje, módulos, actividades formativas y evaluación. De este modo, cada resultado de aprendizaje se encuentra asociado con contenidos y evidencias de desempeño concretas y no únicamente con la exposición de una materia.

***Tabla 3-19**: Resultados de aprendizaje propuestos para el curso.*

Resultado de aprendizaje	Descripción del desempeño esperado	Módulo asociado
RdA1. Interpretar el marco normativo y los criterios de seguridad operacional relevantes para el mantenimiento de RPAS/drones.	Distingue conceptos de RPA, RPAS y UAS; identifica normativa y responsabilidades relevantes; reconoce los límites del curso y relaciona la condición técnica del equipo con la operación segura.	Módulo 1
RdA2. Caracterizar la arquitectura técnica de un RPAS y reconocer los límites generales de intervención.	Identifica la aeronave, estación de pilotaje remoto, sistemas de energía y propulsión, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware y cargas útiles, explicando su integración y posibles restricciones de intervención.	Módulo 2
RdA3. Analizar sistemas eléctricos, de propulsión y energía utilizados en RPAS/drones.	Explica el funcionamiento general de motores, controladores electrónicos de velocidad, baterías, distribución de energía, conectores y cableado, e identifica condiciones que requieren inspección o diagnóstico.	Módulo 3
RdA4. Analizar condiciones técnicas asociadas a sensores, navegación, comunicaciones y cargas útiles.	Interpreta el funcionamiento básico de GNSS, RTK, IMU, magnetómetro, sensores, cámaras, enlaces de mando y control y telemetría, identificando alertas, degradaciones o anomalías relevantes.	Módulo 4
RdA5. Interpretar documentación, software, firmware y procedimientos de fabricante aplicables al mantenimiento.	Utiliza documentación técnica pública, alertas, configuraciones, versiones, actualizaciones y criterios de calibración para identificar procedimientos, compatibilidades, límites de intervención y situaciones que requieren derivación.	Módulo 5
RdA6. Elaborar registros técnicos orientados a la trazabilidad del mantenimiento de RPAS/drones.	Completa listas de verificación, registros de inspección, historial de fallas, documentación de intervenciones, control de baterías, actualizaciones, calibraciones y pruebas funcionales.	Módulo 6
RdA7. Aplicar criterios de inspección, diagnóstico y mantenimiento dentro del alcance técnico definido.	Ejecuta inspecciones, identifica y clasifica condiciones anómalas, aplica criterios básicos de diagnóstico y propone acciones de mantenimiento preventivo, sustitución o derivación según corresponda.	Módulo 7
RdA8. Integrar criterios técnicos, documentales y de seguridad operacional para resolver un caso aplicado de mantenimiento RPAS.	Analiza una situación técnica, realiza una inspección, identifica hallazgos, consulta documentación, registra antecedentes, evalúa riesgos y fundamenta una decisión de intervención o derivación.	Módulo 8

***Fuente:** Elaboración propia a partir del perfil de egreso y la estructura modular propuestos en esta sección.*

***Nota:** Los resultados de aprendizaje corresponden a capacidades formativas desarrolladas dentro del alcance de un curso de educación continua. No constituyen por sí mismos una licencia, habilitación aeronáutica ni autorización para ejecutar intervenciones restringidas por la autoridad aeronáutica, el fabricante u otros requisitos aplicables.*

La evaluación del curso se plantea de manera coherente con su carácter teórico-práctico. Se combinan actividades destinadas a verificar la comprensión de fundamentos con instancias que permiten observar la aplicación de criterios de inspección, diagnóstico, documentación, procedimientos de fabricante y toma de decisiones.

La evaluación conceptual se utiliza principalmente para verificar la comprensión del marco normativo, arquitectura general y fundamentos de los sistemas. Las actividades prácticas permiten observar el desempeño frente a componentes y situaciones técnicas; la elaboración de registros evalúa específicamente la dimensión documental y de trazabilidad; y el caso integrador final permite verificar la capacidad de combinar conocimientos y criterios provenientes de distintos módulos.

La propuesta no considera la asistencia o la memorización de contenidos como evidencia suficiente de logro. Se privilegian productos y desempeños observables, tales como identificación de condiciones técnicas, interpretación de documentación, elaboración de registros, análisis de fallas y fundamentación de decisiones de intervención o derivación.

***Tabla 3-20**: Propuesta de evaluación del curso.*

Componente de evaluación	Descripción	Ponderación sugerida	Resultados de aprendizaje asociados
Evaluación conceptual normativa y técnica	Actividad aplicada sobre marco RPAS, arquitectura del sistema, fundamentos de sistemas técnicos, seguridad operacional y límites de intervención.	**20 %**	RdA1, RdA2, RdA3, RdA4
Taller de inspección técnica	Inspección de componentes y sistemas, identificación de condiciones anómalas y análisis de baterías, propulsión, sensores, navegación, comunicaciones u otros elementos técnicos.	**20 %**	RdA2, RdA3, RdA4, RdA7
Taller de documentación y procedimientos de fabricante	Interpretación de documentación, alertas, configuraciones, firmware, calibraciones, compatibilidad y límites de intervención, junto con elaboración de registros técnicos asociados.	**20 %**	RdA5, RdA6, RdA7
Actividad de diagnóstico y decisión técnica	Análisis de una falla o condición anómala, identificación de posibles causas y fundamentación de una acción de mantenimiento, seguimiento o derivación.	**15 %**	RdA3, RdA4, RdA5, RdA7
Caso integrador final	Resolución de un caso aplicado que combine inspección, diagnóstico, documentación, análisis de seguridad operacional, procedimientos de fabricante y decisión fundamentada de intervención o derivación.	**25 %**	RdA1–RdA8
Total		**100 %**	

***Fuente:** Elaboración propia a partir de los resultados de aprendizaje y la estructura modular propuestos en esta sección.*

***Nota:** Las ponderaciones corresponden a una propuesta de diseño académico y podrán ser ajustadas por la unidad responsable en una eventual implementación. Las actividades de evaluación se desarrollan dentro de la carga horaria establecida para los respectivos módulos y no representan horas adicionales a la duración total del curso.*

El caso integrador final constituye la principal instancia de articulación de los aprendizajes. La actividad puede desarrollarse sobre un RPAS disponible para fines formativos o mediante un caso técnico documentado con anomalías o fallas simuladas. El participante deberá revisar los antecedentes, efectuar o planificar una inspección, identificar hallazgos relevantes, consultar la documentación disponible, elaborar los registros correspondientes y proponer una acción técnicamente fundamentada.

A partir de estos antecedentes, deberá determinar si la situación se encuentra dentro del alcance de intervención considerado para la actividad o si requiere revisión o derivación especializada. La decisión deberá fundamentarse considerando condición técnica, documentación disponible, procedimientos aplicables, límites de intervención y seguridad operacional.

La correspondencia entre resultados de aprendizaje y evaluación permite verificar de manera progresiva las principales dimensiones de la propuesta. Los fundamentos normativos y sistémicos se evalúan inicialmente; los sistemas técnicos, procedimientos de fabricante y documentación se observan mediante actividades aplicadas; y el caso final integra diagnóstico, trazabilidad, criterio técnico y seguridad operacional.

3.5.10 Requerimientos básicos de implementación

La implementación de la propuesta formativa requiere definir condiciones mínimas asociadas a recursos humanos, infraestructura, equipamiento, materiales, soporte técnico y gestión académica. Estos requerimientos permiten traducir la estructura curricular desarrollada previamente en necesidades concretas de ejecución y constituyen insumos para la evaluación técnico-económica de puesta en marcha.

Al tratarse de un curso de educación continua con enfoque de especialización técnica, su desarrollo no puede depender exclusivamente de actividades expositivas. La estructura propuesta incorpora contenidos conceptuales, análisis de documentación técnica, actividades prácticas de inspección y diagnóstico, elaboración de registros, interpretación de procedimientos de fabricante y un taller integrador. En consecuencia, la implementación debe considerar recursos académicos y condiciones técnicas compatibles con el logro de los resultados de aprendizaje definidos.

En materia de recursos humanos, se considera necesario disponer de un docente principal con experiencia pertinente en mantenimiento aeronáutico, sistemas eléctricos o electrónicos, aviónica, RPAS u otras áreas técnicas relacionadas con los contenidos del curso. Su función

corresponde a conducir los contenidos conceptuales y técnicos, orientar las actividades aplicadas, supervisar los procedimientos desarrollados y apoyar la integración de criterios de mantenimiento, documentación y seguridad operacional.

Para las actividades prácticas se considera adicionalmente un apoyo técnico o ayudante. Esta función comprende la preparación del espacio de trabajo, organización de materiales y componentes, disposición del instrumental y apoyo durante las actividades prácticas. Su participación adquiere especial relevancia en los módulos que requieren manipulación de componentes, mediciones, diagnóstico o utilización de herramientas.

Respecto de la infraestructura, se requiere una sala para el desarrollo de contenidos conceptuales, análisis de casos, revisión documental y evaluaciones, además de un laboratorio o espacio técnico controlado para las actividades prácticas. El espacio práctico debe permitir organizar estaciones de trabajo, utilizar instrumental y desarrollar procedimientos de inspección, diagnóstico y documentación en condiciones adecuadas de seguridad.

La incorporación de actividades prácticas responde a la necesidad de vincular los fundamentos técnicos con situaciones de aplicación. En educación en ingeniería, las actividades de laboratorio pueden favorecer metodologías de aprendizaje activo y la aplicación de conocimientos a problemas y equipos concretos (Van den Beemt et al., 2023). Para efectos de esta propuesta, las actividades prácticas se utilizan principalmente para desarrollar competencias de inspección, diagnóstico, interpretación de información técnica, documentación y toma de decisiones.

No todas las actividades prácticas requieren efectuar vuelos reales con RPAS. Una parte relevante de los resultados de aprendizaje puede desarrollarse mediante inspección física de componentes, evaluación de baterías, bancos didácticos, utilización de instrumental, interpretación de telemetría y alertas, análisis de fallas, revisión de documentación y elaboración de registros. En caso de incorporarse pruebas funcionales o actividades de vuelo,

estas deberán desarrollarse bajo las condiciones operacionales, de seguridad y normativas que correspondan.

En materia de equipamiento, se propone combinar una plataforma RPAS de carácter industrial utilizada como sistema de referencia con componentes y bancos didácticos modulares. La plataforma completa permite observar la integración de estructura, propulsión, alimentación eléctrica, sensores, navegación, comunicaciones, software y cargas útiles, mientras que los componentes didácticos permiten desarrollar actividades de inspección, medición, manipulación y diagnóstico sin utilizar permanentemente el RPAS industrial como banco de desmontaje.

La implementación requiere además herramientas e instrumental adecuados para actividades de mantenimiento, electricidad y electrónica. Entre estos recursos se consideran herramientas manuales, multímetros, elementos de protección frente a descargas electrostáticas, instrumentos de inspección, cargadores y equipos complementarios. También se requieren computadores y recursos digitales para trabajar con documentación técnica, software, firmware, telemetría y herramientas de configuración o diagnóstico disponibles para las plataformas utilizadas.

La cantidad de recursos no se determina mediante la duplicación completa del equipamiento en cada puesto. Los elementos de utilización continua deben disponer de una cantidad suficiente para no interrumpir las actividades, mientras que determinados instrumentos especializados o utilizados únicamente en etapas específicas pueden compartirse entre puestos. Este criterio permite dimensionar la inversión según las necesidades reales de utilización simultánea y será posteriormente valorizado en el modelo técnico-económico.

También se consideran necesarios formatos de documentación para las actividades formativas, incluyendo listas de verificación, registros de inspección, historial de fallas, control de baterías, intervenciones, calibraciones y pruebas funcionales, además de casos técnicos y pautas para las evaluaciones.

***Tabla 3-21**: Requerimientos básicos de implementación del curso.*

Categoría de requerimiento	Requerimiento propuesto	Propósito dentro del curso
Docente principal	Profesional o académico con experiencia pertinente en mantenimiento aeronáutico, sistemas eléctricos/electrónicos, aviónica, RPAS o áreas técnicas afines.	Conducir contenidos técnicos y conceptuales, supervisar actividades aplicadas y orientar el taller integrador.
Apoyo técnico o ayudante	Personal de apoyo para preparación del laboratorio, materiales, equipos y asistencia durante actividades prácticas.	Facilitar la organización y supervisión de talleres técnicos.
Sala de clases	Espacio con proyección, computador, acceso a Internet y capacidad suficiente para los participantes.	Desarrollar contenidos conceptuales, análisis de casos, revisión documental y evaluaciones.
Laboratorio o espacio técnico controlado	Espacio habilitado para estaciones prácticas, utilización de instrumental y manipulación controlada de componentes.	Desarrollar inspección, diagnóstico y actividades técnicas dentro del alcance formativo definido.
RPAS industrial de referencia	Plataforma profesional completa utilizada principalmente para observación e integración de sistemas.	Analizar la interacción de estructura, propulsión, energía, sensores, navegación, comunicaciones, software y cargas útiles.
Bancos y componentes didácticos	Motores, ESC, baterías, controladores, sensores, conectores, estructuras y otros componentes apropiados para actividades formativas.	Permitir manipulación, inspección, medición y diagnóstico sin utilizar permanentemente el RPAS industrial como banco de desmontaje.
Instrumental y herramientas	Herramientas manuales, multímetros, elementos ESD, instrumentos de inspección, cargadores y equipos complementarios.	Desarrollar actividades de inspección, medición, diagnóstico y mantenimiento.
Recursos digitales	Computadores, documentación técnica, aplicaciones y herramientas de configuración o diagnóstico disponibles.	Interpretar documentación, software, firmware, telemetría, alertas y procedimientos técnicos.
Formatos de documentación	Bitácoras, listas de verificación y registros de inspección, fallas, intervenciones, baterías, calibraciones y pruebas funcionales.	Desarrollar competencias de documentación y trazabilidad.
Materiales de consumo y reposición	Consumibles técnicos de taller, componentes didácticos de reposición y materiales requeridos por las actividades.	Permitir la ejecución repetida de actividades prácticas.
Material de evaluación	Casos técnicos, pautas, instrumentos de evaluación y formatos para el caso integrador.	Verificar el logro de los resultados de aprendizaje.
Gestión académica	Coordinación de inscripción, calendarización, docentes, recursos, seguimiento y cierre de cada versión.	Facilitar una implementación ordenada dentro de la modalidad de educación continua.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de la estructura curricular y los requerimientos técnicos desarrollados en la sección 3.5.*

***Nota:** Los recursos descritos corresponden a requerimientos académicos y técnicos para efectos de diseño y evaluación de factibilidad. La propuesta no busca reproducir un servicio técnico autorizado por un fabricante ni atribuir al curso facultades de certificación o habilitación aeronáutica.*

3.5.10.1 Dimensionamiento de la capacidad práctica

Además de identificar los recursos requeridos, resulta necesario establecer una escala de operación compatible con la infraestructura utilizada como referencia para la evaluación. Para ello se considera un laboratorio con ocho puestos físicos de trabajo, antecedente institucional utilizado para la construcción del modelo.[3]

La configuración práctica preferente considera dos participantes por puesto, por lo que una cohorte base de 16 participantes puede distribuirse de la siguiente manera:

$$N_{base} = 8 * 2 = 16\ participantes$$

La matrícula de 16 participantes se utiliza como escenario base de evaluación y no corresponde a una estimación de demanda, matrícula esperada ni disposición a participar.

La utilización de equipos reducidos por estación resulta compatible con experiencias de laboratorio en educación en ingeniería. Como referencia, Lancashire y Vanhoestenberghe (2021) describen una experiencia presencial de laboratorio de ingeniería biomédica en la cual los estudiantes trabajaban en grupos de dos o tres integrantes. Este antecedente no se utiliza para definir un tamaño universalmente óptimo, sino únicamente como referencia de que configuraciones reducidas de dos o tres participantes pueden utilizarse en actividades prácticas de ingeniería.

Para matrículas superiores a 16 participantes y hasta un máximo de 20 dentro de un mismo bloque práctico, se considera incorporar un tercer participante únicamente en los puestos necesarios. La distribución se amplía progresivamente de la siguiente manera:

[3] Los antecedentes utilizados para representar ocho puestos de laboratorio y la capacidad referencial de la sala teórica fueron proporcionados durante el desarrollo de la memoria para construir el escenario de implementación. Se utilizan como parámetros de evaluación.

$$N = 17\text{: } 1\ puesto\ de\ 3 + 7\ puestos\ de\ 2$$
$$N = 18\text{: } 2\ puesto\ de\ 3 + 6\ puestos\ de\ 2$$
$$N = 19\text{: } 3\ puesto\ de\ 3 + 5\ puestos\ de\ 2$$
$$N = 20\text{: } 4\ puesto\ de\ 3 + 4\ puestos\ de\ 2$$

La incorporación de un tercer participante no constituye la configuración estándar del laboratorio. Corresponde a una extensión operacional acotada destinada a absorber matrículas entre 17 y 20 participantes, manteniéndose como configuración preferente dos participantes por estación.

Esta decisión responde primero a un criterio de factibilidad práctica. Mientras la distribución de participantes permita desarrollar la misma actividad, utilizar los puestos disponibles y mantener las evidencias de aprendizaje esperadas, no resulta necesario abrir anticipadamente un segundo bloque práctico. El efecto económico de esta decisión se cuantifica posteriormente en el modelo, pero no constituye el único fundamento para la configuración seleccionada.

Cuando la matrícula supera los 20 participantes, las actividades prácticas deben organizarse en grupos secuenciales que reutilizan el laboratorio, las herramientas y el equipamiento disponible. No se considera la ejecución simultánea de dos bloques prácticos. Por tanto, a partir de 21 participantes se requiere repetir las horas prácticas correspondientes al escenario formativo evaluado.

Para la primera implementación se utiliza un límite máximo de evaluación de 32 participantes. Este valor acota el análisis a una operación de hasta dos grupos prácticos secuenciales y no representa una estimación de demanda. Asimismo, se considera una capacidad referencial de 40 participantes para las sesiones teóricas, por lo que, dentro del rango de matrícula evaluado, la principal restricción operacional se concentra en las actividades prácticas.[4]

[4] Los antecedentes utilizados para representar ocho puestos de laboratorio y la capacidad referencial de la sala teórica fueron proporcionados durante el desarrollo de la memoria para construir el escenario de implementación.

***Tabla 3-22**: Parámetros base para la evaluación técnico-económica de puesta en marcha*

Parámetro de implementación	Valor o criterio base propuesto	Uso en la evaluación técnico-económica
Escenarios de duración	24, 40, 60 y 80 horas cronológicas	Comparar cobertura curricular, carga docente, infraestructura y costos.
Matrícula base de evaluación	16 participantes	Construir un escenario común de comparación. No representa una estimación de demanda.
Puestos físicos de referencia	8 puestos	Representar la infraestructura práctica considerada.
Configuración práctica preferente	2 participantes por puesto	Distribuir la matrícula base entre las ocho estaciones.
Configuración práctica extendida	Hasta 3 participantes únicamente en los puestos necesarios	Incorporar matrículas entre 17 y 20 participantes sin habilitar un segundo bloque práctico.
Capacidad máxima de un bloque práctico	20 participantes	Establecer el umbral operacional para una única cohorte práctica.
Umbral para segundo bloque práctico	Desde 21 participantes	Determinar cuándo deben repetirse secuencialmente las actividades prácticas.
Grupos prácticos simultáneos	1	Permitir la reutilización del mismo laboratorio, instrumental y equipamiento.
Matrícula máxima de primera implementación	32 participantes	Delimitar el rango inicial de evaluación y sensibilidad.
Capacidad referencial de sala teórica	40 participantes	Verificar que las sesiones conceptuales puedan desarrollarse dentro del rango evaluado.
Docente principal	1 docente por actividad programada	Estimar necesidades docentes y costos asociados.
Apoyo técnico	1 ayudante durante las actividades prácticas	Estimar apoyo requerido y costo correspondiente.
Plataforma RPAS industrial	1 plataforma de referencia	Disponer de un sistema profesional para observación e integración de sistemas.
Equipamiento práctico	Dimensionado según frecuencia y necesidad de utilización simultánea	Determinar herramientas, componentes e instrumental que deben adquirirse o compartirse.

***Fuente:** Elaboración propia a partir del diseño curricular y los antecedentes de infraestructura descritos en la sección 3.5.10.*

Los requerimientos definidos permiten transformar la propuesta curricular en parámetros operacionales susceptibles de valorización. La duración de cada escenario determina la carga docente y el uso de infraestructura; las horas prácticas condicionan la utilización del laboratorio, equipamiento y apoyo técnico; y la matrícula determina la cantidad de participantes por puesto y la eventual necesidad de repetir bloques prácticos.

Esta relación permite que la evaluación posterior no se limite a un presupuesto agregado. El modelo técnico-económico incorpora la estructura curricular, capacidad práctica, recursos docentes, infraestructura, equipamiento y escala de matrícula para analizar distintas configuraciones bajo supuestos explícitos.

3.6 Evaluación preliminar de puesta en marcha mediante modelo técnico-económico

La presente sección desarrolla una evaluación preliminar de puesta en marcha de la alternativa formativa seleccionada. El propósito del análisis no consiste únicamente en elaborar una estimación de costos, sino en construir un modelo técnico-económico de apoyo a la decisión que permita relacionar el diseño curricular con sus requerimientos operacionales, de capacidad, inversión y desempeño económico-financiero.

Esta etapa permite traducir la propuesta académica desarrollada previamente en variables cuantificables asociadas a duración, carga práctica, recursos docentes, utilización de infraestructura, capacidad de laboratorio, equipamiento, inversión inicial, costos de operación, matrícula y precio. De esta manera, la factibilidad de implementación se analiza considerando simultáneamente condiciones académicas, técnicas, operacionales y económicas.

El modelo se implementa mediante una planilla parametrizada en Microsoft Excel. La utilización de esta herramienta responde a la necesidad de mantener visibles y editables los principales supuestos, fórmulas y relaciones entre variables, permitiendo reproducir los cálculos, modificar parámetros y comparar escenarios sin alterar la estructura general del modelo. Excel constituye, por tanto, la implementación computacional principal de la evaluación y funciona como una herramienta de apoyo a la decisión, no como un producto de software independiente.

De manera complementaria, se incorpora Solver de Excel para formalizar la selección entre alternativas que cumplen previamente las restricciones académicas y operacionales definidas. Su utilización permite representar la elección de escenarios mediante variables de decisión y

una función objetivo, manteniendo explícitas las restricciones del problema. La optimización no se utiliza para determinar artificialmente la matrícula o el precio del curso, sino para apoyar la comparación entre configuraciones previamente definidas y curricularmente admisibles.

La evaluación considera cuatro escenarios de duración: 24, 40, 60 y 80 horas cronológicas. Estas alternativas no corresponden a estimaciones de demanda ni a modalidades institucionales previamente aprobadas, sino a configuraciones utilizadas para analizar distintos niveles de profundidad formativa y sus implicancias sobre recursos y costos.

La comparación se estructura en dos etapas. En primer lugar, se verifica la suficiencia curricular de cada escenario respecto de los ocho módulos y del alcance formativo definido en la sección anterior. Bajo las asignaciones horarias establecidas en esta investigación, el escenario de 24 horas no permite cubrir íntegramente la estructura curricular propuesta; las alternativas de 40, 60 y 80 horas continúan, por tanto, hacia la evaluación técnico-económica. En segundo lugar, las alternativas académicamente admisibles se comparan considerando capacidad práctica, utilización de recursos, costos, inversión y resultados económico-financieros.

Esta secuencia evita seleccionar una alternativa exclusivamente por presentar un menor costo o un mejor resultado financiero. La evaluación económica se aplica una vez comprobada la consistencia de la configuración con los requerimientos académicos previamente establecidos. De esta manera, la decisión de implementación mantiene subordinado el criterio económico al cumplimiento mínimo del diseño formativo.

La dimensión técnico-operacional incorpora los recursos necesarios para ejecutar cada escenario. Se consideran docentes, apoyo técnico, sala, laboratorio, plataforma RPAS de referencia, componentes didácticos, instrumental, herramientas y materiales, junto con las restricciones derivadas de la capacidad práctica y de la programación anual.

En particular, el modelo utiliza como referencia un laboratorio con ocho puestos de trabajo. La configuración preferente considera dos participantes por estación, equivalente a una matrícula base de 16 participantes. Entre 17 y 20 participantes se permite incorporar un tercer integrante únicamente en los puestos necesarios. Cuando la matrícula supera los 20 participantes, las actividades prácticas deben repetirse mediante grupos secuenciales, reutilizando el mismo laboratorio, instrumental y equipamiento. Para la primera implementación, el rango de evaluación se limita a un máximo de 32 participantes.

La apertura de un segundo bloque práctico produce un cambio discreto en determinados costos, debido principalmente a la repetición de horas de laboratorio, docencia o apoyo técnico asociadas a las actividades prácticas. Esta característica permite representar que el aumento de matrícula no genera necesariamente un incremento continuo de los resultados económicos, ya que determinados umbrales de capacidad obligan a modificar la organización operacional del curso.

La dimensión temporal considera además la programación de cada versión durante el año. Para ello se incorporan la duración del escenario, una carga semanal de referencia y períodos destinados a preparación, ejecución, cierre y holgura. La cantidad máxima de versiones que admite el calendario se interpreta como una restricción de capacidad anual y no como una proyección de ventas o demanda efectiva.

***Tabla 3-23**: Estructura general del modelo técnico-económico de puesta en marcha.*

Bloque del modelo	Elementos principales	Propósito
Diseño curricular	Escenarios de 24, 40, 60 y 80 horas; módulos; horas prácticas; resultados de aprendizaje.	Verificar la suficiencia formativa de cada alternativa.
Capacidad operacional	Puestos de laboratorio, participantes por puesto, grupos prácticos secuenciales, sala teórica y programación anual.	Determinar las restricciones físicas y temporales de implementación.
Recursos humanos	Docente principal, apoyo técnico y coordinación académica.	Estimar requerimientos de horas y costos asociados a cada escenario.
Infraestructura y equipamiento	Sala, laboratorio, RPAS industrial, componentes didácticos, herramientas, instrumental y recursos digitales.	Dimensionar los recursos necesarios y distinguir inversión inicial de utilización recurrente.
Estructura de costos	Inversión inicial, costos por versión, costos variables por participante y costos recurrentes anuales.	Representar los desembolsos sin duplicar recursos reutilizables.
Ingresos y operación	Matrícula, precio por participante y número de versiones.	Estimar ingresos y flujos operacionales bajo distintos escenarios.
Evaluación financiera	Capital de trabajo, flujo de caja, VAN, recuperación de inversión y puntos de equilibrio.	Evaluar las condiciones económicas asociadas a la puesta en marcha.
Sensibilidad	Variaciones de matrícula, precio, tasa de descuento, horizonte y restricciones de capacidad.	Examinar la robustez de los resultados frente a parámetros inciertos.
Selección de alternativa	Restricciones curriculares y operacionales, comparación de escenarios y Solver.	Identificar la configuración con mejor desempeño relativo entre las alternativas admisibles.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de la propuesta curricular y la metodología técnico-económica descrita en la sección 3.6.*

***Nota:** El modelo corresponde a una herramienta parametrizada de apoyo a la decisión. Los valores de matrícula, precio, número de versiones y demás parámetros de escenario no constituyen pronósticos de demanda ni decisiones comerciales definitivas de la USM.*

Desde la perspectiva económica, el modelo diferencia entre inversión inicial, costos asociados a cada versión y costos recurrentes anuales. La inversión inicial incorpora los recursos reutilizables necesarios para la puesta en marcha, incluyendo plataforma RPAS, componentes didácticos, instrumental, herramientas y habilitación inicial, además del capital de trabajo correspondiente. Los costos por versión consideran principalmente recursos humanos, utilización de infraestructura, materiales, costos variables por participante, coordinación académica y otros cargos asociados a la ejecución. Los costos recurrentes

anuales incorporan aquellos conceptos que benefician al programa durante el período completo y no únicamente a una cohorte.

Esta clasificación busca representar la naturaleza temporal de cada desembolso y evitar duplicidades. Los elementos reutilizables se reconocen como inversión inicial, mientras que consumibles, reposiciones menores y otros conceptos dependientes de la cantidad de participantes se incorporan a los costos de operación. Los criterios específicos de clasificación y valorización se desarrollan posteriormente en la formulación del modelo.

La evaluación económico-financiera se sustenta en criterios habituales de evaluación de proyectos. De acuerdo con Sapag Chain y Sapag Chain (2008), la evaluación requiere identificar las inversiones, construir los flujos relevantes del proyecto e incorporar el valor temporal del dinero para comparar beneficios y costos en distintos períodos. Sobre esta base, el modelo considera inversión inicial, capital de trabajo, flujos operacionales, Valor Actual Neto (VAN), recuperación de la inversión, puntos de equilibrio y análisis de sensibilidad.

El Valor Actual Neto se utiliza como uno de los principales indicadores para comparar los resultados económicos de las configuraciones evaluadas, dado que incorpora el valor temporal del dinero mediante la actualización de los flujos del proyecto. No obstante, el VAN no se interpreta de manera aislada. Se complementa con indicadores de operación y equilibrio para distinguir entre la capacidad del curso para cubrir sus costos recurrentes y su capacidad para recuperar la inversión inicial dentro del horizonte considerado.

Esta distinción resulta necesaria porque una configuración puede presentar flujo operacional positivo y, al mismo tiempo, no recuperar completamente la inversión inicial durante el período analizado. En consecuencia, la cobertura de los costos operacionales no se considera equivalente a rentabilidad financiera.

El modelo incorpora además capital de trabajo mediante el método del período de desfase, siguiendo el criterio de estimar los recursos necesarios para cubrir los egresos operacionales durante el intervalo considerado antes de disponer plenamente de los ingresos del proyecto

(Sapag Chain & Sapag Chain, 2008). El procedimiento de cálculo, el período utilizado y su tratamiento dentro del flujo se desarrollan posteriormente junto con los demás supuestos financieros.

La incertidumbre de los resultados se aborda mediante análisis de sensibilidad. Este procedimiento permite observar cómo varían los indicadores frente a cambios en parámetros que no se conocen con certeza al momento de realizar la evaluación, particularmente matrícula, precio, tasa de descuento, horizonte y condiciones de capacidad. De este modo, la recomendación de puesta en marcha no depende exclusivamente de un único conjunto de supuestos.

La selección mediante Solver se incorpora después del filtro curricular. Las alternativas admisibles pueden representarse mediante variables binarias de selección, imponiendo que se elija una única configuración y que esta satisfaga las restricciones académicas y operacionales definidas. La función objetivo se vincula al desempeño económico de las alternativas. La formulación detallada de las variables, restricciones y función objetivo se presenta posteriormente en la sección correspondiente.

La alternativa que presente el mejor resultado relativo no se interpreta automáticamente como una recomendación de implementación. La decisión final debe considerar conjuntamente suficiencia curricular, restricciones de capacidad, inversión requerida, desempeño operacional, resultados financieros, sensibilidad y posicionamiento respecto de las referencias comerciales disponibles.

En consecuencia, el modelo técnico-económico permite vincular de manera trazable el diseño académico con sus condiciones de puesta en marcha. Su finalidad es identificar qué configuraciones satisfacen el alcance formativo y en qué condiciones operacionales y económicas podrían implementarse, sin reemplazar una evaluación financiera institucional definitiva ni constituir una estimación de demanda futura.

Para facilitar la trazabilidad y reproducción de los resultados, el modelo técnico-económico se entrega como archivo Excel editable, identificado en el Anexo D. La planilla contiene el detalle de los requerimientos de puesta en marcha, incluyendo el inventario y dimensionamiento del equipamiento, herramientas, componentes didácticos, cotizaciones y fuentes de referencia, junto con los recursos humanos, infraestructura, costos, inversión inicial y capital de trabajo. Asimismo, incorpora las fórmulas, restricciones, escenarios, indicadores económico-financieros y análisis de sensibilidad utilizados para fundamentar la selección de la alternativa y sus condiciones preliminares de implementación.

3.6.1 Enfoque del modelo técnico-económico

El modelo técnico-económico se estructura como una herramienta preliminar de apoyo a la decisión, orientada a evaluar las condiciones de puesta en marcha de la propuesta de educación continua en mantenimiento técnico de RPAS/drones. Su finalidad es comparar distintas configuraciones del curso considerando de manera integrada criterios curriculares, técnico-operacionales y económico-financieros. De esta forma, la evaluación no se limita a la elaboración de un presupuesto, sino que permite analizar qué alternativas cumplen el alcance académico definido, qué recursos requieren y en qué condiciones podrían resultar operacional y económicamente viables.

Para este propósito, el modelo se organiza en tres dimensiones de evaluación: curricular-formativa, técnico-operacional y económico-financiera. Las tres se encuentran relacionadas, pero cumplen funciones distintas dentro del proceso de decisión y se analizan de manera secuencial.

La dimensión curricular-formativa tiene por finalidad verificar que las alternativas evaluadas mantengan la cobertura establecida en el syllabus propuesto. Para ello se utilizan como referencia los ocho módulos desarrollados previamente, sus contenidos, resultados de aprendizaje y asignaciones horarias. En consecuencia, la factibilidad curricular de un escenario no se determina únicamente por su duración total o por un porcentaje general de

actividades prácticas, sino por su capacidad para cubrir el alcance formativo definido para la propuesta.

Este criterio establece una condición previa a la comparación económica. Una alternativa no se considera admisible únicamente por presentar menores costos o un mejor resultado financiero si, al mismo tiempo, exige reducir contenidos o actividades consideradas necesarias para alcanzar los resultados de aprendizaje. De esta manera, el criterio económico se incorpora después de verificar la suficiencia curricular de cada escenario.

La distribución entre actividades conceptuales y prácticas también deriva de la estructura modular. El modelo no impone un porcentaje práctico fijo como requisito independiente, sino que utiliza las horas asignadas a cada módulo de acuerdo con la naturaleza de sus contenidos y actividades. En la configuración de referencia de 40 horas, esta distribución resulta del diseño curricular desarrollado previamente y no de una proporción establecida externamente.

La dimensión técnico-operacional analiza los recursos y restricciones necesarios para ejecutar cada alternativa. Se consideran recursos humanos, infraestructura, equipamiento, capacidad de laboratorio, cantidad de participantes por puesto, organización de grupos prácticos, utilización de sala y laboratorio y disponibilidad temporal para programar las distintas versiones del curso.

Para representar la capacidad práctica se utiliza como referencia un laboratorio con ocho puestos físicos de trabajo. La configuración preferente corresponde a dos participantes por estación, equivalente a una matrícula base de 16 participantes. Para matrículas entre 17 y 20 participantes se admite incorporar un tercer integrante únicamente en los puestos necesarios, manteniendo una sola cohorte práctica. De esta forma, se adopta una capacidad máxima de 20 participantes para un único bloque práctico.

Cuando la matrícula supera los 20 participantes, las actividades prácticas deben organizarse en bloques secuenciales que reutilizan el laboratorio, las herramientas y el equipamiento disponible. Para efectos de la primera implementación, el rango de evaluación se limita a un

máximo de 32 participantes. Estos valores corresponden a parámetros de capacidad utilizados en el modelo y no a proyecciones de demanda.

La dimensión técnico-operacional incorpora además la planificación temporal de cada escenario. Se consideran la duración del curso, la carga semanal de referencia, los períodos de preparación, ejecución, cierre y holgura, y la disponibilidad anual utilizada para la modelación. Estos parámetros permiten estimar el tiempo requerido por cada versión y la cantidad máxima de versiones que podría admitir el calendario. Esta última corresponde a una restricción de capacidad de programación y no a una estimación de ventas efectivas.

La dimensión económico-financiera transforma los requerimientos curriculares y operacionales en inversión, costos, ingresos y flujos de caja. Para ello, el modelo distingue entre inversión técnica inicial, habilitación inicial, capital de trabajo, costos asociados a cada versión y costos recurrentes anuales. Esta separación permite representar la naturaleza temporal de los desembolsos y evitar contabilizar repetidamente recursos reutilizables.

La inversión técnica inicial considera la plataforma RPAS industrial de referencia, componentes didácticos, herramientas, instrumental y otros recursos reutilizables necesarios para la puesta en marcha. La habilitación inicial considera la preparación previa de material docente, evaluaciones y formatos. El capital de trabajo se incorpora separadamente como requerimiento de liquidez inicial. Los costos por versión consideran, entre otros conceptos, docencia, apoyo técnico, coordinación, utilización de sala y laboratorio, costos variables por participante, contingencia y comisión institucional. Adicionalmente, se incorporan costos recurrentes anuales asociados al mantenimiento de la plataforma RPAS y a la difusión del programa.

A partir de esta estructura, el modelo calcula ingresos, costos operacionales, flujo de caja, precio de equilibrio, matrícula de equilibrio, recuperación de la inversión y Valor Actual Neto (VAN). Estos indicadores permiten distinguir entre la capacidad del programa para cubrir sus costos recurrentes y su capacidad para recuperar la inversión inicial durante el horizonte analizado.

La evaluación se fundamenta en criterios habituales de evaluación de proyectos, donde resulta necesario identificar las inversiones relevantes, estructurar los flujos de caja y considerar el valor temporal del dinero para comparar costos y beneficios distribuidos en distintos períodos (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008). El VAN se utiliza como uno de los principales indicadores de comparación financiera, complementándose con puntos de equilibrio, recuperación de la inversión y análisis de sensibilidad.

La distinción entre resultado operacional y recuperación de la inversión resulta especialmente relevante. Un escenario puede generar un flujo operacional positivo y, al mismo tiempo, presentar un VAN negativo dentro del horizonte considerado. Por ello, la existencia de margen operacional no se interpreta automáticamente como evidencia de rentabilidad financiera.

La lógica de decisión se desarrolla de forma secuencial. En primer lugar, cada escenario se somete a una verificación de factibilidad curricular respecto del syllabus propuesto. Posteriormente, las alternativas que satisfacen esta condición se analizan desde la perspectiva técnico-operacional y económico-financiera. De esta manera, una alternativa curricularmente insuficiente queda excluida antes de realizar la selección económica definitiva.

La comparación de las alternativas admisibles se implementa mediante fórmulas visibles en la planilla y, de manera complementaria, mediante Solver de Microsoft Excel. Para cada escenario se define una variable binaria de selección y se restringe el problema a la elección de una única alternativa curricularmente factible. La función objetivo utiliza el VAN correspondiente a las condiciones de evaluación establecidas para comparar el desempeño relativo de las configuraciones.

La elección de Excel responde a la necesidad de disponer de una implementación parametrizada, transparente y fácilmente actualizable, en la cual puedan identificarse directamente los supuestos, fórmulas y relaciones entre variables. Solver se utiliza de manera complementaria para formalizar el problema de selección sujeto a restricciones, sin reemplazar la lógica principal del modelo ni ocultar sus cálculos.

La matrícula y el precio no se incorporan como variables libres de decisión de Solver. Ambos permanecen como parámetros de escenario que posteriormente se modifican mediante análisis de sensibilidad. Esta decisión evita que el proceso de optimización genere automáticamente combinaciones económicamente favorables sin respaldo comercial u operacional.

Asimismo, la alternativa que presente el mayor VAN entre los escenarios admisibles no se interpreta automáticamente como una recomendación de implementación. Si todos los escenarios presentan resultados negativos bajo determinadas condiciones, la selección mediante Solver identifica únicamente la alternativa de mejor desempeño relativo. La conveniencia de una eventual puesta en marcha debe evaluarse posteriormente considerando los puntos de equilibrio, la sensibilidad de los resultados y las condiciones de matrícula, precio y capacidad.

La parametrización permite modificar los principales supuestos cuando se disponga de información institucional más precisa. Costos docentes, infraestructura, equipamiento, matrícula, precio, planificación anual, tasa de descuento u otros antecedentes pueden actualizarse sin modificar la estructura lógica del modelo. Esta característica permite distinguir entre datos respaldados, parámetros derivados y supuestos de evaluación, manteniendo la trazabilidad de los resultados.



***Figuras 3-2**: Secuencia de evaluación del modelo técnico-económico de puesta en marcha.*

***Fuente:** Elaboración propia.*

***Nota:** La evaluación económica se realiza únicamente después de verificar la factibilidad curricular de cada escenario. Matrícula y precio permanecen como parámetros de análisis y no como variables libres de optimización.*

***Tabla 3-24**: Dimensiones y criterios de evaluación incorporados al modelo técnico económico.*

Dimensión evaluada	Criterio considerado	Propósito dentro del modelo
Factibilidad curricular	Cumplimiento de los contenidos, resultados de aprendizaje y asignaciones horarias definidos para los ocho módulos del syllabus propuesto.	Evitar la selección de alternativas económicamente favorables que no satisfagan el alcance formativo establecido.
Distribución teórico-práctica	Horas conceptuales, prácticas y aplicadas derivadas de la estructura modular de cada escenario.	Verificar coherencia entre actividades, contenidos y resultados de aprendizaje sin imponer una proporción práctica externa.
Capacidad práctica	Participantes por puesto, ocho puestos disponibles, capacidad por bloque y apertura de grupos secuenciales.	Representar las restricciones físicas del laboratorio y el efecto de la matrícula sobre la operación del curso.
Recursos humanos	Horas de docente principal, apoyo técnico y coordinación académica.	Determinar los requerimientos de personal y sus costos para cada escenario.
Infraestructura	Utilización de sala teórica y laboratorio según las horas correspondientes a cada escenario.	Incorporar los recursos físicos requeridos para la ejecución.
Equipamiento e inversión	Plataforma RPAS industrial, componentes didácticos, herramientas, instrumental y habilitación inicial.	Dimensionar los recursos reutilizables necesarios para la puesta en marcha.
Costos por versión	Docencia, apoyo técnico, infraestructura, costos variables, coordinación, contingencia y comisión institucional.	Estimar el costo de ejecución de cada cohorte bajo una estructura comparable.
Planificación anual	Duración, carga semanal, preparación, cierre, holgura y disponibilidad anual.	Estimar capacidad de programación y diferenciarla de la cantidad efectiva de versiones ejecutadas.
Evaluación económico-financiera	Ingresos, costos, flujo operacional, capital de trabajo, precio y matrícula de equilibrio, recuperación de inversión y VAN.	Analizar las condiciones requeridas para cubrir la operación y recuperar la inversión inicial.
Sensibilidad	Variaciones de matrícula, precio, tasa de descuento, horizonte de evaluación y capacidad práctica.	Evaluar la robustez de los resultados frente a cambios en los principales supuestos.
Selección y optimización	Comparación entre escenarios curricularmente admisibles y selección del mayor VAN mediante fórmulas y Solver.	Apoyar la selección de una configuración sin utilizar matrícula o precio como variables libres para forzar rentabilidad.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de las dimensiones y restricciones definidas para el modelo en la sección 3.6.1.*

***Nota:** El modelo constituye una herramienta preliminar de apoyo a la decisión y no un modelo de pronóstico de demanda. La matrícula, el precio y la cantidad de versiones utilizados corresponden a parámetros de evaluación y escenarios de análisis. El mejor resultado relativo entre las alternativas admisibles no implica necesariamente rentabilidad financiera positiva ni una recomendación automática de implementación.*

En consecuencia, el enfoque definido permite relacionar de manera trazable el diseño curricular con los recursos necesarios para su ejecución y con las condiciones económicas de puesta en marcha. La recomendación final se fundamentará en el cumplimiento conjunto de requisitos formativos, restricciones técnico-operacionales y resultados económico-financieros, complementados mediante análisis de sensibilidad.

3.6.2 Supuestos, variables y datos de entrada del modelo

La construcción del modelo técnico-económico requiere definir los supuestos, parámetros y datos de entrada utilizados para representar una eventual puesta en marcha del curso de educación continua en mantenimiento técnico de RPAS/drones. Estos antecedentes permiten traducir la propuesta curricular y sus requerimientos operacionales en variables cuantificables, manteniendo trazabilidad respecto de su origen, tratamiento y función dentro de la evaluación.

Los antecedentes utilizados se clasifican según su procedencia. Un primer grupo corresponde a fuentes oficiales o institucionales documentadas, como el valor de la Unidad Tributaria Mensual (UTM) y el valor utilizado como referencia para el apoyo técnico. Un segundo grupo comprende antecedentes proporcionados específicamente para la construcción del modelo, entre ellos el costo hora docente, la valorización de sala y laboratorio, la comisión asociada a Educación Continua, la capacidad referencial de sala y el presupuesto de difusión. Un tercer grupo corresponde a cotizaciones y precios observados de equipamiento, mientras que un cuarto grupo comprende supuestos explícitos de modelación utilizados cuando no se dispone de un antecedente institucional definitivo.

Esta diferenciación permite evitar que los parámetros utilizados con fines de evaluación sean interpretados como tarifas oficiales, estimaciones de demanda o decisiones comerciales definitivas. Los valores clasificados como supuestos permanecen editables en la planilla y pueden ser actualizados posteriormente sin modificar la estructura lógica del modelo.

Para efectos de comparación se consideran cuatro escenarios de duración:

$$S = \{24,40,60,80\}$$

donde cada elemento representa la cantidad de horas cronológicas asociada a una configuración alternativa del curso.

Los escenarios corresponden a alternativas internas de evaluación y no a duraciones establecidas por una norma o estándar externo. El escenario de 24 horas representa una configuración reducida respecto del alcance curricular completo; el escenario de 40 horas corresponde a la cobertura resultante de las asignaciones desarrolladas módulo a módulo para la propuesta; mientras que los escenarios de 60 y 80 horas permiten analizar configuraciones con mayor profundidad formativa y desarrollo práctico.

La duración total no constituye por sí sola un criterio de factibilidad. Cada escenario debe cumplir previamente las condiciones curriculares establecidas en el syllabus propuesto. De esta forma, una alternativa de menor duración no puede ser seleccionada únicamente por presentar menores costos si requiere reducir contenidos o actividades consideradas necesarias para alcanzar los resultados de aprendizaje.

La distribución entre actividades conceptuales y prácticas tampoco se establece mediante un porcentaje fijo definido de manera previa. En la configuración curricular de referencia de 40 horas, la asignación módulo a módulo determina 19 horas conceptuales y 21 horas prácticas o aplicadas. Esta distribución constituye un resultado del diseño curricular desarrollado en la investigación y no una proporción mínima establecida por normativa o por una fuente externa.

Para los restantes escenarios se utilizan distribuciones diferenciadas como parámetros internos de comparación, manteniendo una mayor profundidad y carga práctica en los escenarios de mayor duración. Su función es permitir analizar el efecto de la extensión del curso sobre recursos docentes, infraestructura, equipamiento y costos, manteniendo la estructura de ocho módulos como referencia.

Tabla 3-25: *Principales supuestos y datos de entrada del modelo técnico-económico*

Grupo	Parámetro	Símbolo	Valor utilizado	Origen y justificación
Matrícula	Matrícula base por versión	N_{base}	16 participantes	Escenario común de comparación. Coincide con la configuración preferente de los ocho puestos mediante dos participantes por puesto. No constituye una estimación de demanda.
Capacidad	Capacidad práctica extendida	L_{ext}	20 participantes	Amplía la capacidad de un bloque desde 16 hasta 20 participantes mediante la incorporación de un tercer integrante únicamente en los puestos necesarios, manteniendo ocho estaciones físicas.
Capacidad	Puestos físicos disponibles	K	8 puestos	Disposición del laboratorio utilizada como antecedente para representar la infraestructura práctica considerada en la evaluación.
Capacidad	Participantes por puesto	r_{base}	2 participantes	Configuración práctica preferente para distribuir la matrícula base entre los ocho puestos disponibles.
Capacidad	Participantes máximos por puesto en configuración extendida	r_{ext}	3 participantes	Flexibilidad utilizada únicamente en los puestos necesarios cuando la matrícula se encuentra entre 17 y 20 participantes.
Capacidad	Grupos prácticos simultáneos	G_{sin}	1 grupo	Los grupos adicionales se programan secuencialmente para reutilizar laboratorio, instrumental y equipamiento.
Capacidad	Matrícula máxima de primera implementación	$N_{max,lanz}$	32 participantes	Límite utilizado para acotar la evaluación inicial a una operación de hasta dos bloques prácticos secuenciales. No representa demanda esperada.
Capacidad	Capacidad referencial de sala teórica	S	40 participantes	Permite comprobar que, dentro del rango analizado, la principal restricción de capacidad se encuentra en el componente práctico.
Duración	Escenarios evaluados	H_S	24, 40, 60 y 80 h	Alternativas internas de comparación. Las 40 horas corresponden a la cobertura completa del diseño curricular

				propuesto; 24 horas representa una configuración reducida y 60 y 80 horas permiten evaluar mayor profundización.
Calendario	Semanas disponibles al año	W_{disp}	44 semanas	Supuesto conservador que evita considerar las 52 semanas del año como completamente disponibles para ejecución.
Calendario	Carga semanal	H_{sem}	10 h/semana	Supuesto de programación utilizado para distribuir las actividades del curso.
Calendario	Preparación previa	W_{prep}	2 semanas	Considera inscripción, coordinación docente, preparación de laboratorio, materiales y organización previa.
Calendario	Cierre	W_{cierre}	1 semana	Considera evaluaciones, registros, cierre académico y actividades administrativas posteriores.
Calendario	Holgura	W_{holg}	1 semana	Reserva de programación entre versiones para absorber ajustes o retrasos.
Calendario	Versiones objetivo año 1	V_{obj}	3 versiones	Escenario común de planificación utilizado para comparar alternativas. No constituye una proyección de ventas.
Recursos humanos	Costo hora docente	C_{doc}	$40.000 CLP/h	Valor informado para efectos de valorización de la propuesta.
Recursos humanos	Costo hora apoyo técnico	C_{ayud}	$6.610 CLP/h	Valor informado para efectos de valorización de la propuesta.
Coordinación	Horas de coordinación	H_{coord}	8 h/versión	Supuesto operacional destinado a representar preparación específica, coordinación, revisión y cierre de cada cohorte.
Coordinación	Costo de coordinación por versión	C_{coord}	$320.000 CLP/versión	Valor derivado de 8 h * $40.000/h manteniendo trazabilidad con el costo hora docente.
Infraestructura	UTM septiembre 2026	UTM	$71.721 CLP	Valor oficial publicado por el Servicio de Impuestos Internos para septiembre de 2026.
Infraestructura	Uso de sala	C_{sala}	1 UTM/h = $71.721 CLP/h	Valor de referencia utilizado para valorizar económicamente una sala institucional existente.
Infraestructura	Uso de laboratorio	C_{lab}	1,5 UTM/h = $107.581,5 CLP/h	Valor de referencia utilizado para valorizar un espacio técnico con infraestructura y recursos especializados.

Variables	Consumibles técnicos	C_{cons}	\$15.000 CLP/participante	Supuesto editable destinado a materiales consumibles de taller, limpieza, soldadura, cables, conectores y otros insumos menores.
Variables	Reposición menor	C_{rep}	\$10.000 CLP/participante	Provisión para desgaste o reposición de componentes didácticos de bajo costo. No incluye activos reutilizables.
Variables	Material individual	C_{mat}	\$5.000 CLP/participante	Considera guías, listas de verificación, formatos de trabajo y materiales individuales.
Variables	Costo variable total	C_{var}	\$30.000 CLP/participante	Parámetro derivado de $C_{cons} + C_{rep} + C_{mat}$.
Riesgo	Contingencia	λ	5 %	Reserva para reconocer incertidumbre menor propia de una estimación preliminar. La existencia de contingencia se sustenta en principios generales de estimación de costos; el 5 % constituye un supuesto del modelo (AACE International, 2008).
Indirectos	Comisión Educación Continua	τ_{EC}	20 %	Antecedente proporcionado por la USM para la evaluación de la propuesta. Se aplica sobre el subtotal de costos previo a comisión, una vez incorporada la contingencia.
Inversión	Plataforma RPAS industrial	I_{RPAS}	\$8.990.000 CLP	Cotización de una plataforma profesional utilizada como referencia técnica, sin orientar el syllabus a una única marca o modelo.
Inversión	Componentes didácticos	I_{comp}	\$804.340 CLP	Resultado de cotizaciones de bancos y componentes modulares destinados a actividades prácticas.
Inversión	Herramientas, diagnóstico y seguridad	I_{herr}	\$2.741.606 CLP	Resultado de cotizaciones de herramientas, medición eléctrica/electrónica, protección ESD, inspección y otros recursos reutilizables.
Inversión	Habilitación inicial	I_{hab}	\$400.000 CLP	Corresponde a 10 horas iniciales de preparación valorizadas al costo docente definido.

Operación anual	Reserva de mantenimiento RPAS	M_{RPAS}	5 % anual	Provisión económica para mantenimiento de la plataforma. El porcentaje corresponde a un supuesto financiero y no a una tasa definida por el fabricante.
Operación anual	Difusión y marketing	C_{mkt}	$600.000 CLP/año	Presupuesto anual proporcionado como antecedente para la evaluación. Se considera costo anual porque beneficia al programa en su conjunto.
Capital de trabajo	Período de desfase	Mes_{CT}	1 mes	Supuesto utilizado con el método del período de desfase para representar liquidez inicial sin asumir disponibilidad inmediata de todos los ingresos (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008).
Mercado	Techo comercial de evaluación	$P_{max,com}$	$550.000 CLP/participante	Valor utilizado para probar la viabilidad del modelo y contrastar posteriormente sus resultados con referencias de mercado. No representa disposición a pagar medida ni precio recomendado.
Evaluación	Tasa de descuento	i	10 %	Tasa base utilizada para actualizar los flujos. Corresponde a un supuesto financiero y no a una tasa institucional.
Evaluación	Horizonte	T	3 años	Horizonte base utilizado para evaluar la puesta en marcha y recuperación de la inversión. Su efecto se contrasta posteriormente mediante sensibilidad.

Fuente: *Elaboración propia a partir de los antecedentes institucionales, cotizaciones y supuestos individualizados en la tabla y en la sección 3.6.2.*

Nota: *Los valores clasificados como supuestos o antecedentes de evaluación permanecen editables y no deben interpretarse como tarifas institucionales definitivas, demanda esperada, disposición a pagar medida ni decisiones comerciales de la Universidad. Su función es construir un escenario base trazable que pueda actualizarse cuando se disponga de información institucional más precisa.*

Para la valorización de infraestructura se utiliza la UTM correspondiente a septiembre de 2026. El Servicio de Impuestos Internos informa para dicho mes un valor de $71.721, por lo que los antecedentes entregados para sala y laboratorio se convierten a pesos chilenos mediante:

$$C_{sala} = 1 * UTM = \$71.721/h$$

$$C_{lab} = 1{,}5 * UTM = \$107.581{,}5/h$$

La incorporación de estos valores no representa construcción, adquisición ni arriendo externo de nueva infraestructura. Su finalidad es valorizar económicamente el uso de espacios institucionales existentes dentro de una eventual puesta en marcha, evitando asumir un costo nulo por su utilización (Servicio de Impuestos Internos, 2026).

El costo hora docente de $40.000, costo de apoyo técnico, la valorización de sala y laboratorio, la comisión de Educación Continua, la capacidad referencial de sala y el presupuesto anual de difusión corresponden a antecedentes proporcionados para la construcción del modelo. En consecuencia, se utilizan para representar económicamente una eventual implementación y deberán ser validados por las unidades institucionales correspondientes antes de una ejecución real.[5]

Los costos variables por participante se desagregan en consumibles técnicos, reposición menor de componentes didácticos y material individual. Esta separación permite identificar el origen de cada desembolso, modificar sus valores de manera independiente y evitar incorporar como gastos variables aquellos recursos reutilizables considerados dentro de la inversión inicial.

Asimismo, se utiliza una contingencia de 5 % para reconocer incertidumbre menor asociada a una estimación preliminar de costos. AACE International (2008) reconoce la contingencia como un componente utilizado para considerar incertidumbre dentro de estimaciones de costos; sin embargo, el porcentaje específico de 5 % utilizado en esta investigación corresponde a un supuesto explícito de modelación y no a una tasa establecida por dicha referencia.

[5] Los valores correspondientes al costo hora docente, valorización de sala y laboratorio, comisión de Educación Continua, capacidad referencial de sala y presupuesto anual de difusión fueron proporcionados como antecedentes para representar económicamente una eventual implementación. No se presentan como tarifas institucionales públicas o definitivas.

La inversión inicial se desagrega en plataforma RPAS industrial, componentes didácticos, herramientas e instrumental y habilitación inicial. Esta separación permite mantener trazabilidad sobre el origen de la inversión y distinguir los recursos reutilizables de aquellos desembolsos asociados a la ejecución recurrente de las versiones del curso.

La reserva anual equivalente al 5 % del valor de la plataforma RPAS se utiliza como provisión económica para posibles requerimientos de mantenimiento durante el período de evaluación. Si bien la documentación de fabricante permite respaldar la necesidad de efectuar mantenimiento periódico, el porcentaje utilizado constituye un supuesto financiero del modelo y no una tasa establecida por DJI u otro fabricante.

Para incorporar el requerimiento de liquidez inicial se utiliza el método del período de desfase. Este criterio permite estimar el capital de trabajo requerido para financiar los costos operacionales durante el período considerado entre la ocurrencia de los egresos y la disponibilidad de los ingresos del proyecto (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008). En el modelo se adapta a una periodicidad mensual mediante:

$$CT = \frac{C_{op,año}}{12} * Mes_{CT}$$

Donde CT corresponde al capital de trabajo, $C_{op,año}$ a los costos operacionales anuales desembolsables y Mes_{CT} a la cantidad de meses utilizada como período de desfase.

Para el escenario base se adopta un mes de desfase. Este valor constituye un supuesto de modelación financiera y no representa que los participantes paguen el arancel un mes después del inicio del curso ni una política institucional de cobranza. Su finalidad es evitar asumir que la totalidad de los ingresos se encuentra disponible de manera inmediata frente a los egresos iniciales.

El valor de $550.000 por participante se utiliza como techo comercial de evaluación. Su propósito es probar las condiciones de viabilidad del modelo y permitir posteriormente un contraste con referencias de mercado y con los puntos de equilibrio obtenidos. No constituye

una medición de disposición a pagar ni el precio recomendado para la eventual puesta en marcha.

Finalmente, la tasa de descuento de 10 % y el horizonte de tres años se utilizan como supuestos financieros del escenario base. La tasa permite actualizar los flujos futuros y el horizonte establece el período sobre el cual se analiza la recuperación de la inversión y la generación de valor. Ninguno de estos parámetros corresponde a una condición institucional definitiva; por ello, su efecto se evalúa posteriormente mediante análisis de sensibilidad, de acuerdo con la necesidad de examinar cómo cambios en parámetros inciertos modifican los resultados del proyecto (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008).

En conjunto, estos parámetros conforman el escenario base utilizado para comparar las alternativas de puesta en marcha. Su clasificación según origen permite diferenciar antecedentes documentados, cotizaciones, parámetros derivados y supuestos de modelación, manteniendo la trazabilidad necesaria para actualizar la evaluación si posteriormente se dispone de información institucional o comercial más precisa.

3.6.3 Formulación del modelo técnico-económico

A partir de los parámetros definidos en la sección anterior, el modelo técnico-económico transforma la estructura curricular y los requerimientos de implementación en relaciones cuantificables que permiten estimar capacidad, utilización de recursos, costos, ingresos, inversión inicial y resultados económico-financieros. La formulación busca que cada expresión represente una condición concreta de funcionamiento del curso y que los resultados puedan ser recalculados cuando se modifiquen los parámetros de entrada.

La estructura económica distingue entre inversión inicial, costos asociados a cada versión y costos recurrentes anuales. Esta separación responde a que los recursos considerados poseen distinta naturaleza y periodicidad. La plataforma RPAS, los componentes didácticos, las herramientas y el instrumental pueden utilizarse durante distintas versiones del curso y, por tanto, se incorporan como inversión técnica inicial. En cambio, la docencia, el apoyo técnico,

la utilización de infraestructura y los materiales se generan cada vez que se ejecuta una cohorte. Finalmente, determinados conceptos, como la reserva de mantenimiento de la plataforma y la difusión del programa, se incorporan a nivel anual.

La habilitación inicial se diferencia de los costos recurrentes debido a que corresponde a actividades realizadas antes de la primera ejecución, tales como preparación de guías, evaluaciones y formatos de documentación. Asimismo, el capital de trabajo se incorpora como un requerimiento de liquidez asociado a la puesta en marcha y no como un costo de cada versión.

Esta clasificación evita contabilizar repetidamente recursos adquiridos una única vez y permite estructurar posteriormente los flujos de caja de acuerdo con la temporalidad de los ingresos y egresos considerados en la evaluación de proyectos (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008).

***Tabla 3-26**: Estructura de costos considerada en el modelo técnico-económico*

Categoría	Componentes incluidos	Tratamiento dentro del modelo
Inversión técnica inicial	Plataforma RPAS industrial, componentes didácticos, herramientas, instrumental, equipos de diagnóstico y elementos de seguridad.	Se registra como desembolso inicial. Los recursos se consideran reutilizables durante las distintas versiones del curso.
Habilitación inicial	Elaboración inicial de guías, evaluaciones, formatos de trazabilidad y material docente.	Se incorpora una única vez antes de la primera ejecución.
Recursos humanos por versión	Docencia, apoyo técnico y coordinación académica.	Se calculan según las horas correspondientes a cada escenario y, cuando corresponda, la cantidad de bloques prácticos requeridos.
Infraestructura por versión	Sala teórica y laboratorio.	Se valoriza en función de las horas efectivamente utilizadas en cada escenario y de las repeticiones prácticas requeridas.
Costos variables	Consumibles técnicos, reposición menor de componentes didácticos y material individual.	Aumentan en función de la cantidad de participantes de cada versión.
Contingencia	5 % de los costos directos definidos en el modelo.	Incorpora una reserva para reconocer incertidumbre menor en la estimación previa a la implementación.
Comisión institucional	20 % aplicado sobre el subtotal posterior a contingencia, según el criterio utilizado en el modelo.	Se incorpora como componente indirecto asociado a la ejecución de cada versión.
Mantenimiento anual	Reserva para mantenimiento de la plataforma RPAS industrial.	Se incorpora como costo recurrente anual del programa y no como costo individual de cada cohorte.
Difusión y marketing anual	Presupuesto destinado a difusión del programa.	Se incorpora una vez por año y beneficia al conjunto de versiones programadas.
Capital de trabajo	Recursos requeridos para cubrir el período inicial de desfase de caja.	Se incorpora al flujo inicial de inversión y se considera recuperable al término del horizonte de evaluación.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de la estructura de costos y los supuestos descritos en la sección 3.6.2.*

***Nota:** La clasificación distingue entre desembolsos iniciales, costos asociados directamente a la ejecución de una versión y costos recurrentes anuales. Los porcentajes de contingencia y comisión corresponden a los criterios de evaluación definidos en el modelo y deberán validarse institucionalmente antes de una implementación real.*

La incorporación de contingencia responde a que una estimación realizada antes de la ejecución se encuentra expuesta a incertidumbre respecto de precios, materiales y condiciones de implementación. AACE International (2008) reconoce la contingencia como un componente utilizado para tratar incertidumbre dentro de las estimaciones de costos. En

esta investigación, el 5 % corresponde a un supuesto explícito y editable del modelo, por lo que no se interpreta como una tasa normativa ni como un porcentaje recomendado universalmente por dicha referencia.

La formulación se desarrolla a continuación desde las restricciones operacionales hacia la estructura de costos, ingresos y evaluación financiera. En primer lugar, se determina la capacidad práctica y la cantidad de bloques requeridos; posteriormente se calculan las horas efectivamente ejecutadas, los costos por versión, los flujos anuales y los indicadores utilizados para comparar los escenarios.

3.6.3.1 Capacidad efectiva del bloque práctico

La capacidad práctica se determina a partir de los ocho puestos de trabajo considerados como infraestructura de referencia. Para la matrícula base de 16 participantes se adopta la configuración preferente de dos participantes por puesto:

$$Cap_{base} = K * r_{base} =$$

Donde:

$$K = 8$$

$$r_{base} = 2$$

Por lo tanto:

$$Cap_{base} = 8 * 2 = 16\, participantes$$

Esta configuración constituye la distribución preferente para las actividades prácticas, debido a que permite utilizar simultáneamente los ocho puestos manteniendo grupos reducidos por estación.

Cuando la matrícula supera los 16 participantes, el modelo permite incorporar un tercer integrante únicamente en los puestos necesarios. Esta posibilidad se utiliza como una extensión operacional acotada y no como configuración estándar del laboratorio.

Para una matrícula N comprendida entre 17 y 20 participantes, la cantidad de puestos que debe incorporar un tercer integrante se determina mediante:

$$P_3(N) = N - 16$$

Donde $P_3(N)$ corresponde a la cantidad de puestos con tres participantes.

Los puestos restantes mantienen la configuración base de dos integrantes:

$$P_2(N) = K - P_3(N)$$

Donde $P_2(N)$ corresponde a la cantidad de puestos con dos participantes.

La distribución satisface:

$$N = 3P_3(N) + 2P_2(N)$$

Por ejemplo, para una matrícula de 20:

$$P_3(20) = 20 - 16 = 4$$

Y:

$$P_2(20) = 8 - 4 = 4$$

Por tanto:

$$(4 * 3) + (4 * 2) = 20$$

Para efectos de la primera implementación, se adopta como capacidad máxima de un único bloque práctico:

$$Cap_{grupo} = 20\ participantes$$

Este valor constituye una restricción conservadora de diseño del modelo. Aunque ocho puestos con tres participantes permitirían matemáticamente distribuir hasta 24 personas, no se considera adecuado utilizar tres integrantes en la totalidad de las estaciones como configuración habitual. La extensión hasta 20 participantes limita la utilización de un tercer integrante a un máximo de cuatro de los ocho puestos y mantiene la configuración de dos participantes en al menos la mitad de las estaciones.

Por lo tanto, el valor de 20 participantes no representa la capacidad física absoluta del laboratorio, sino el umbral operacional adoptado para la evaluación. Su pertinencia deberá ser comprobada mediante validación académica o una eventual primera ejecución,

verificando que la incorporación de un tercer participante en determinados puestos no afecte la participación práctica ni el logro de los resultados de aprendizaje.

La capacidad del laboratorio tampoco implica que cada puesto deba disponer de una réplica completa de todas las herramientas e instrumentos. Los recursos se dimensionan según su necesidad de utilización simultánea. Los elementos requeridos de forma continua durante una actividad deben disponer de unidades suficientes, mientras que determinados instrumentos especializados o utilizados únicamente en etapas específicas pueden ser compartidos entre estaciones.

Este criterio permite evitar duplicaciones de inversión que no incrementen efectivamente la capacidad formativa, manteniendo la disponibilidad necesaria de aquellos recursos que sí condicionan el desarrollo simultáneo de las actividades prácticas.

Cuando la matrícula supera los 20 participantes, la capacidad adoptada para un único bloque práctico se considera excedida y deben programarse bloques prácticos adicionales de manera secuencial, reutilizando el mismo laboratorio, herramientas y equipamiento. La cantidad de bloques requeridos y su efecto sobre las horas efectivamente ejecutadas se formalizan en la subsección siguiente.

3.6.3.2 Número de grupos y repeticiones prácticas

Una vez establecida una capacidad máxima de 20 participantes por bloque práctico, el número de grupos requeridos para una matrícula N se calcula mediante:

$$G(N) = \left\lceil \frac{N}{Cap_{grupo}} \right\rceil$$

Donde:

- $G(N)$: número de grupos prácticos requeridos.
- N: matricula de la versión.
- Cap_{grupo}: capacidad máxima definida para un único bloque práctico.

Dado que:

$$Cap_{grupo} = 20$$

y que el rango analizado para una primera implementación se encuentra limitado a 32 participantes, se obtiene:

$$G(N) = \begin{cases} 1, & 1 \leq N \leq 20 \\ 2, & 21 \leq N \leq 32 \end{cases}$$

La función se redondea hacia arriba debido a que los grupos prácticos constituyen unidades discretas. Por ejemplo, una matrícula de 21 participantes no puede representarse operacionalmente mediante 1,05 grupos, sino que requiere la organización de dos grupos prácticos.

El modelo incorpora además la cantidad de grupos que pueden ejecutarse simultáneamente, representada mediante G_{sim}. La cantidad de ejecuciones o repeticiones necesarias del componente práctico se calcula como:

$$R(N) = \left\lceil \frac{G(N)}{G_{sim}} \right\rceil$$

Donde $R(N)$ corresponde a la cantidad de veces que debe ejecutarse el conjunto de actividades prácticas de una versión.

Para la configuración de puesta en marcha se considera:

$$G_{sim} = 1$$

debido a que se utiliza un único laboratorio y los mismos recursos técnicos son reutilizados entre grupos. Por tanto:

$$R(N) = G(N)$$

dentro del rango de matrícula analizado.

Por lo tanto, una matrícula de hasta 20 participantes requiere una única ejecución del componente práctico, mientras que desde 21 participantes las actividades prácticas deben ejecutarse una segunda vez de manera secuencial. Esta condición permite ampliar la matrícula sin duplicar permanentemente el laboratorio, instrumental y equipamiento principal.

La apertura de un segundo grupo práctico introduce, sin embargo, un cambio discreto en la utilización de recursos. Mientras la matrícula permanece dentro de un único bloque, el

aumento de participantes afecta principalmente los costos variables individuales. Al superar los 20 participantes, deben repetirse las horas prácticas correspondientes al escenario evaluado, incrementándose la utilización de laboratorio y los requerimientos de docencia y apoyo técnico asociados a dichas actividades.

Este comportamiento se incorpora explícitamente al modelo para evitar asumir que los costos aumentan de manera estrictamente proporcional a la matrícula.

3.6.3.3 Horas institucionales de ejecución

Para efectos de la evaluación resulta necesario diferenciar entre las horas formativas que recibe cada participante y las horas que la institución debe ejecutar para desarrollar una versión del curso. Ambas magnitudes coinciden cuando todas las actividades pueden impartirse a una única cohorte; sin embargo, se diferencian cuando el componente práctico debe repetirse para grupos secuenciales.

Para cada escenario S, se distinguen:

$$H_s^{teo}$$

como las horas conceptuales o teóricas recibidas por cada participante, y:

$$H_s^{prac}$$

como las horas prácticas o aplicadas recibidas por cada participante.

Debido a que la capacidad referencial de la sala teórica es de 40 participantes y la matrícula máxima analizada para la primera implementación corresponde a 32 participantes, las horas conceptuales pueden impartirse en una única cohorte. En consecuencia, estas horas no requieren repetición dentro del rango evaluado.

Las horas prácticas efectivamente ejecutadas por la institución se calculan mediante:

$$H_s^{prac,ef} = H_s^{prac} * R(N)$$

Donde $R(N)$ representa la cantidad de ejecuciones requeridas del componente práctico.
Por lo tanto, las horas institucionales totales asociadas a una versión corresponden a:

$$H_s^{inst} = H_s^{teo} + H_s^{prac,ef}$$

O equivalentemente:

$$H_s^{inst} = H_s^{teo} + H_s^{prac} * R(N)$$

Esta expresión permite mantener constante la cantidad de horas formativas recibidas por cada participante y, al mismo tiempo, representar el aumento de recursos institucionales que se produce cuando las actividades prácticas deben repetirse para una segunda cohorte.

Por ejemplo, para el escenario de referencia de 40 horas se consideran:

$$H_{40}^{teo} = 19\ h$$

$$H_{40}^{prac} = 21\ h$$

Con una matrícula de hasta 20 participantes:

$$R(N) = 1$$

por lo que:

$$H_{40}^{inst} = 19 + (21 * 1) = 40\ h$$

En cambio, para una matrícula entre 21 y 32 participantes:

$$R(N) = 2$$

y las horas institucionales ejecutadas aumentan a:

$$H_{40}^{inst} = 19 + (21 * 2) = 61\ h$$

Cada participante continúa recibiendo 40 horas de formación, pero la institución debe ejecutar 61 horas para impartir el mismo escenario cuando el componente práctico se divide en dos grupos secuenciales.

Esta relación explica parte del comportamiento no lineal de los costos respecto de la matrícula. Mientras no se supera la capacidad de un bloque práctico, el incremento de participantes se concentra principalmente en los costos variables por persona. Al superar los 20 participantes, se produce adicionalmente un aumento en las horas institucionales de docencia práctica, apoyo técnico y utilización de laboratorio.

La formulación permite, de esta forma, incorporar la restricción de capacidad del laboratorio directamente en la estructura de costos del modelo, manteniendo separada la duración académica recibida por el participante de la carga efectiva que debe ejecutar la institución.

3.6.3.4 Coordinación académica por versión

La coordinación académica se modela como un costo recurrente asociado a cada versión del curso. Con el propósito de mantener trazabilidad respecto de su origen, este costo se expresa mediante horas de trabajo en lugar de utilizar un monto global independiente.

El costo de coordinación por versión se calcula mediante:

$$C_{coord} = H_{coord} * C_{doc}$$

Donde:

- C_{coord}: costo de coordinación académica por versión.
- H_{coord}: horas de coordinación asignadas a cada versión.
- C_{doc}: costo hora utilizado para la valorización docente;

Con:

$$H_{coord} = 8\ h/versión$$

Y:

$$C_{doc} = \$40.000/h$$

Por lo que:

$$C_{coord} = 8 * 40.000 = \$320.000/versión$$

Las ocho horas corresponden a un supuesto operacional destinado a representar actividades de preparación específica de cada cohorte, coordinación, revisión y cierre. Este costo se diferencia de la habilitación inicial debido a que la coordinación vuelve a producirse cada vez que se ejecuta una versión, mientras que la habilitación inicial se realiza una única vez antes de la primera implementación.

3.6.3.5 Costos variables por participante

Los costos variables corresponden a aquellos desembolsos cuya magnitud aumenta con la cantidad de participantes. Debido a que la propuesta aún no ha sido implementada, no se dispone de registros históricos de consumo que permitan estimar directamente estos costos a partir de versiones anteriores.

Para efectos de la evaluación preliminar se adopta un costo variable de referencia de:

$$C_{var} = \$30.000/participante$$

Este valor corresponde a un supuesto editable de modelación y no representa una tarifa institucional ni un consumo histórico observado. Su función es incorporar aquellos materiales y reposiciones menores que pueden generarse durante las actividades prácticas, documentales y evaluativas.

Para mantener trazabilidad sobre su composición, el costo se desagrega en tres componentes:

$$C_{var} = C_{cons} + C_{rep} + C_{mat}$$

Donde:

- C_{cons} = consumibles técnicos del taller.
- C_{rep} = provisión para reposición menor de componentes didácticos.
- C_{mat} = materiales individuales de trabajo.

Por tanto:

$$C_{var} = 15.000 + 10.000 + 5.000 = \$30.000/participante$$

El costo variable total asociado a una versión con matrícula N se expresa como:

$$CV(N) = C_{var} * N$$

La desagregación permite modificar cada componente de manera independiente cuando se disponga de información real de consumo. De esta forma, el supuesto inicial puede ser reemplazado progresivamente por antecedentes observados sin modificar la estructura del modelo.

3.6.3.6 Costo directo por versión

El costo directo de ejecución de una versión correspondiente al escenario s se obtiene sumando los recursos cuya utilización se produce durante dicha cohorte.

Dado que las horas prácticas pueden requerir repetición cuando se supera la capacidad de un único bloque, el costo directo depende tanto del escenario de duración como de la matrícula:

$$C_s^{dir}(N) = C_{coord} + C_{doc} * H_s^{inst}(N) + C_{ayud} * H_s^{prac,ef}(N) + C_{sala} * H_s^{teo} + C_{lab} * H_s^{prac,ef}(N) + C_{var} * N$$

Donde:

- C_{coord}: costo de coordinación por versión.
- C_{doc}: costo hora del docente principal.
- $H_s^{inst}(N)$: horas institucionales de docencia requeridas.
- C_{ayud}: costo hora del apoyo técnico.
- $H_s^{prac,ef}(N)$: horas prácticas efectivamente ejecutadas.
- C_{sala}: valorización por hora de sala.
- H_s^{teo}: horas conceptuales o teóricas del escenario.
- C_{lab}: valorización por hora de laboratorio.
- C_{var}: costo variable por participante.
- N: matrícula de versión.

La expresión diferencia entre las horas formativas recibidas por el participante y las horas que la institución debe ejecutar. El docente principal se valoriza considerando la totalidad de las horas institucionales, mientras que el apoyo técnico se incorpora únicamente durante las actividades prácticas. Del mismo modo, la sala se valoriza en función de las horas conceptuales y el laboratorio según las horas prácticas efectivamente ejecutadas.

Esta formulación permite representar el cambio de costos que se produce cuando la matrícula supera la capacidad de un único bloque práctico. Hasta 20 participantes se ejecuta una sola

vez el componente práctico; desde 21 participantes, las horas prácticas, de docencia asociada, apoyo técnico y laboratorio deben repetirse para un segundo grupo secuencial.

La plataforma RPAS, los componentes didácticos reutilizables, las herramientas y el instrumental no se incorporan nuevamente en esta expresión, debido a que sus adquisiciones se registran como inversión inicial. De esta manera, se evita contabilizar repetidamente el mismo desembolso cada vez que se ejecuta una nueva versión.

3.6.3.7 Contingencia y comisión institucional

Una vez determinado el costo directo de una versión, se incorpora la contingencia definida para el modelo:

$$C_s^{cont} = \lambda * C_s^{dir}$$

Con:

$$\lambda = 0{,}05$$

El subtotal posterior a contingencia es:

$$C_s^{sub} = C_s^{dir} + C_s^{cont}$$

Posteriormente se incorpora la comisión correspondiente a Educación Continua de la Universidad Técnica Federico Santa María. Para efectos del modelo, se utiliza una comisión equivalente al 20 % del subtotal de costos previo a comisión, de acuerdo con el antecedente proporcionado por la Universidad para la evaluación:

$$C_s^{EC} = \tau EC * C_s^{sub}$$

donde:

$$\tau EC = 0{,}20$$

El orden de cálculo responde al criterio de valorización utilizado en el modelo: primero se incorpora la contingencia sobre los costos directos y luego se aplica el 20% sobre el subtotal resultante.

El orden de cálculo corresponde al criterio de valorización utilizado en el modelo: primero se aplica la contingencia sobre el costo directo y posteriormente la comisión institucional sobre el subtotal resultante

En consecuencia, el costo total de ejecución de una versión se determina mediante:

$$C_s^{ver} = C_s^{sub} + C_s^{EC}$$

equivalentemente:

$$C_s^{ver} = C_s^{dir}(1 + \lambda)(1 + \tau EC)$$

La contingencia y la comisión cumplen funciones diferentes dentro del modelo. La primera corresponde a una reserva asociada a incertidumbre en la estimación de costos, mientras que la segunda representa un cargo institucional asociado a la ejecución del programa mediante Educación Continua. La comisión del 20 % se trata, por tanto, como un antecedente institucional de valorización y no como un supuesto financiero definido por la investigación.

3.6.3.8 Ingreso, margen y precio de equilibrio operativo por versión.

El ingreso total correspondiente a una versión se calcula como:

$$IT_s(P, N) = P * N$$

Donde:

- P: precio por participante
- N: matricula

El margen operacional por versión se obtiene mediante:

$$M_s(P, N) = IT_s(P, N) - C_s^{ver}(N)$$

Un valor:

$$M_s > 0$$

indica que los ingresos de la cohorte permiten cubrir los costos asociados a su ejecución bajo la estructura definida en el modelo.

Sin embargo, un margen operacional positivo por versión no implica necesariamente recuperación de la inversión inicial ni generación de un VAN positivo dentro del horizonte de evaluación. Por esta razón, el modelo mantiene separados el análisis por cohorte, el flujo operacional anual y la evaluación financiera del proyecto.

Para una matrícula determinada puede calcularse además el precio de equilibrio operativo por versión:

$$P_{s,ver}^{eq}(N) = \frac{C_s^{ver}(N)}{N}$$

Este valor representa el precio unitario mínimo requerido para cubrir exclusivamente el costo asociado a la ejecución de una cohorte bajo una matrícula determinada.

Por lo tanto, $P_{s,ver}^{eq}$ no debe interpretarse automáticamente como el precio recomendado del curso ni como el precio necesario para recuperar la totalidad de la inversión. La recomendación comercial debe considerar adicionalmente los costos recurrentes anuales, la inversión inicial, el capital de trabajo, la cantidad de versiones, el horizonte de evaluación, el resultado financiero y las referencias de mercado analizadas posteriormente.

La distinción entre precio de equilibrio operativo y precio de implementación resulta necesaria para evitar que la cobertura de los costos de una cohorte sea interpretada como equivalente a la sostenibilidad económica completa del programa.

3.6.3.9 Planificación anual

Para determinar cuántas versiones pueden programarse durante un año, las horas institucionales requeridas deben transformarse en semanas de ejecución:

$$W_s^{ejec} = \left\lceil \frac{H_s^{inst}}{H_{sem}} \right\rceil$$

Donde:

- W_s^{ejec}: semanas requeridas para ejecutar las actividades formativas del escenario s.
- H_s^{inst}: horas institucionales totales requeridas.
- H_{sem}: carga semanal de programación utilizada en el modelo.

Para el escenario base se considera:

$$H_{sem} = 10h/semana$$

La utilización de las horas institucionales permite incorporar el tiempo adicional requerido cuando las actividades prácticas deben repetirse para un segundo grupo.

El redondeo se realiza hacia arriba debido a que cualquier fracción adicional de semana requiere reservar capacidad dentro del calendario. La utilización de H_s^{inst} ,y no únicamente

de las horas formativas recibidas por cada estudiante, permite incorporar el tiempo adicional requerido cuando el componente práctico debe repetirse para grupos secuenciales.

El ciclo completo de una versión considera además los períodos de preparación, cierre y holgura:

$$W_s^{ciclo} = W_s^{ejec} + W_{prep} + W_{cierre} + W_{holg}$$

Donde:

- W_{prep}: 2 semanas
- W_{cierre}: 1 semana
- W_{holg}: 1 semana

La cantidad máxima de versiones que permite la disponibilidad anual se obtiene mediante:

$$V_s^{max} = \left\lfloor \frac{W_{disp}}{W_s^{ciclo}} \right\rfloor$$

Con:

$$W_{disp} = 44\ semanas/año$$

En este caso se utiliza redondeo hacia abajo debido a que únicamente pueden contabilizarse versiones completas.

Finalmente, la cantidad de versiones utilizada en el escenario de planificación corresponde a:

$$V_s^{plan} = \min(V_{obj}, V_s^{max})$$

El parámetro $V_{obj} = 3$ representa un supuesto de planificación y no una proyección de demanda. Su utilización permite evaluar las distintas alternativas bajo una frecuencia común de ejecución, mientras que V_s^{max} permite verificar que dicha frecuencia sea compatible con las restricciones del calendario.

De este modo, se diferencia entre la capacidad máxima de programación y la cantidad de versiones utilizada como supuesto de operación. Esta distinción evita interpretar la

disponibilidad del calendario como evidencia de que todas las versiones potencialmente programables serán efectivamente comercializadas.

3.6.3.10 Inversión técnica inicial

La inversión en equipamiento se obtiene mediante:

$$I_{equip} = I_{rpas} + I_{comp} + I_{herr}$$

Con los valores presupuestados:

$$I_{equip} = 8.990.000 + 804.340 + 2.741.606 = \$12.535.946$$

Estos recursos poseen carácter reutilizable y, por tanto, se registran como desembolso inicial en lugar de distribuir su costo artificialmente entre las distintas cohortes. Este tratamiento permite posteriormente evaluar si los flujos generados por la operación del programa son capaces de recuperar la inversión requerida para su puesta en marcha.

A la inversión técnica se agrega una habilitación académica inicial:

$$I_{hab} = H_{diseño,0} * C_{doc}$$

Con:

$$H_{diseño,0} = 10\ h$$

Por lo que:

$$I_{hab} = 10 * 40.000 = \$400.000$$

Las diez horas constituyen un supuesto destinado a representar el trabajo requerido antes de la primera ejecución para preparar guías, evaluaciones, formatos de trazabilidad y otros recursos académicos. La utilización de horas como unidad de cálculo permite reemplazar fácilmente este supuesto si posteriormente se determina una carga efectiva diferente.

3.6.3.11 Costos recurrentes anuales

Además de los costos generados por cada versión, el modelo incorpora costos que afectan al programa durante el año.

La reserva destinada al mantenimiento de la plataforma RPAS se calcula como:

$$C_{mant} = m_{rpas} * I_{rpas}$$

Con:

$$m_{rpas} = 0{,}05$$

Por tanto:

$$C_{mant} = 0{,}05 * 8.990.000 = \$449.500\ /año$$

La inclusión de este componente evita asumir que la plataforma industrial puede utilizarse durante todo el horizonte de evaluación sin generar gastos asociados a mantenimiento. El porcentaje del 5% corresponde a una provisión financiera del modelo y no a un porcentaje de mantenimiento prescrito por el fabricante.

También se incorpora:

$$C_{mkt} = \$600.000\ /año$$

como presupuesto de difusión. El valor se trata como costo anual debido a que las actividades de comunicación y comercialización pueden beneficiar al conjunto de versiones programadas durante el período y no exclusivamente a una cohorte.

3.6.3.12 Flujo operacional anual

Los ingresos anuales del escenario S corresponden a:

$$IT_{s,año} = P * N * V_s^{plan}$$

El costo anual asociado a la ejecución de los cursos se obtiene mediante:

$$C_{s,cursos} = C_s^{ver} * V_s^{plan}$$

Los costos operacionales anuales desembolsables corresponden entonces a:

$$C_{s,año}^{op} = C_{s,cursos} + C_{mant} + C_{mkt}$$

Por tanto, el flujo operacional anual se expresa como:

$$F_s^{op} = IT_{s,año} - C_{s,año}^{op}$$

Este indicador permite determinar si, bajo las condiciones de matrícula, precio y cantidad de versiones consideradas, los ingresos anuales son suficientes para cubrir los costos recurrentes de operación del programa.

La separación entre operación e inversión resulta metodológicamente relevante. Un flujo operacional anual positivo indica que la operación recurrente genera recursos suficientes para

cubrir los desembolsos considerados durante el período, pero no implica necesariamente que la inversión inicial haya sido recuperada ni que el proyecto presente un VAN positivo. Estas condiciones se evalúan posteriormente mediante el flujo financiero completo.

3.6.3.13 Capital de trabajo

Para representar el requerimiento inicial de liquidez se utiliza el método del período de desfase, mediante el cual se estima el capital necesario para cubrir los costos operacionales durante el intervalo considerado antes de disponer plenamente de los ingresos del proyecto (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008).

$$CT_s = \frac{C_{s,año}^{op}}{12} * Mes_{CT}$$

Para el escenario base:

$$Mes_{CT} = 1$$

La división por 12 transforma los costos operacionales anuales en un costo mensual promedio y permite estimar los recursos requeridos para financiar el período de desfase considerado.

El supuesto de un mes no representa una política formal de cobranza de la Universidad ni implica que los participantes cancelen el arancel treinta días después del inicio del curso. Se utiliza como una aproximación de liquidez inicial destinada a evitar el supuesto de disponibilidad inmediata de la totalidad de los ingresos frente a los primeros egresos.

Si posteriormente se dispone de información institucional sobre plazos reales de cobro y pago, el parámetro podrá ser reemplazado directamente en el modelo.

El capital de trabajo no se considera un recurso consumido permanentemente. Para efectos de la evaluación financiera se supone su recuperación al término del horizonte de evaluación, condición que se incorpora posteriormente al flujo terminal.

3.6.3.14 Inversión inicial total

La inversión inicial del escenario se obtiene mediante:

$$I_{0,S} = I_{equip} + I_{hab} + CT_s$$

La expresión incorpora tres componentes de distinta naturaleza: la inversión en equipamiento técnico reutilizable, la habilitación académica previa y el capital de trabajo necesario para cubrir el requerimiento inicial de liquidez.

La inversión técnica y la habilitación representan desembolsos asociados directamente a la puesta en marcha, mientras que el capital de trabajo corresponde a recursos destinados a financiar temporalmente la operación. Por esta razón, este último se considera recuperable al término del horizonte de evaluación.

Para el escenario base no se asigna un valor residual al equipamiento al finalizar los tres años considerados. Esta decisión responde a que no se dispone de antecedentes suficientemente robustos para estimar su valor de reventa o recuperación al término del período. La exclusión del valor residual constituye un tratamiento conservador, ya que evita mejorar el resultado financiero mediante un beneficio terminal cuya magnitud no se encuentra respaldada.

En consecuencia, el flujo terminal incorpora la recuperación del capital de trabajo, pero no un valor de salvamento asociado a la plataforma RPAS, componentes didácticos, herramientas o instrumental. Esta condición deberá modificarse únicamente si posteriormente se dispone de antecedentes objetivos que permitan valorizar dichos activos al término del horizonte considerado.

3.6.3.15 Precio de equilibrio operacional

El modelo calcula el precio necesario para cubrir la operación anual completa:

$$P_{s,op}^{eq} = \frac{C_{s,cursos} + C_{mant} + C_{mkt}}{N * V_s^{plan}}$$

Este indicador determina el precio unitario que permitiría obtener:

$$F_s^{op} = 0$$

bajo una determinada matrícula y cantidad de versiones.

El precio de equilibrio operacional representa, por tanto, el valor mínimo requerido para cubrir los costos recurrentes del programa durante un año bajo las condiciones analizadas. No incorpora por sí solo la recuperación de la inversión inicial ni la rentabilidad exigida sobre dicha inversión, por lo que no debe interpretarse como el precio necesario para obtener un VAN igual a cero.

Asimismo, este indicador no constituye automáticamente el precio que debería cobrar la Universidad. Su interpretación debe complementarse con la inversión inicial, los resultados financieros, la sensibilidad del modelo y las referencias comerciales utilizadas para contextualizar la propuesta.

El valor de $550.000 por participante utilizado en el escenario base se mantiene como un techo comercial de evaluación destinado a contrastar los resultados del modelo con referencias de mercado. No representa disposición a pagar medida ni constituye, por sí mismo, una recomendación final de precio.

3.6.3.16 Matrícula de equilibrio

La matrícula de equilibrio no puede determinarse mediante una única expresión lineal, debido a que la estructura de costos presenta cambios discretos cuando se supera la capacidad máxima adoptada de 20 participantes por bloque práctico. A partir de dicho umbral deben repetirse las actividades prácticas, modificando las horas institucionales y, en consecuencia, el costo de ejecución.

Por esta razón se define como:

$$N_s^{eq} = min\{N \epsilon \mathbb{Z}^+ : F_s^{op}(P, N) \geq 0\}$$

sujeto a:

$$1 \leq N \leq N_{max,lanz}$$

La búsqueda se realiza sobre valores enteros dentro del rango definido para la primera implementación. De esta manera, el modelo incorpora automáticamente el cambio entre uno y dos bloques prácticos y evita asumir que los costos evolucionan de forma continua con el número de participantes.

Si no existe ningún valor de N dentro del rango analizado que satisfaga:

$$F_s^{op}(P, N) \geq 0$$

se considera que el escenario no alcanza equilibrio operacional dentro del rango de matrícula evaluado para el precio utilizado.

Este indicador permite identificar la menor cantidad de participantes necesaria para cubrir los costos recurrentes del programa bajo determinadas condiciones de precio y planificación, sin interpretarla como una proyección de demanda efectiva.

3.6.3.17 Valor Actual Neto

El principal indicador financiero utilizado para comparar los escenarios corresponde al Valor Actual Neto (VAN), debido a que permite considerar conjuntamente la inversión inicial, los flujos futuros y el valor temporal del dinero. Su utilización se encuentra dentro de los procedimientos habituales de evaluación económica de proyectos (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008).

Para el escenario \(s\), el VAN correspondiente al caso planificado se expresa mediante:

$$VAN_s^{plan} = -I_{0,s} + \sum_{t=1}^{T} \frac{F_{s,t}^{op}}{(1+i)^t} + \frac{CT_s}{(1+i)^t}$$

Donde”

- $I_{0,s}$: inversión inicial.
- $F_{s,t}^{op}$: flujo operacional correspondiente al año t.
- i: tasa de descuento.
- T: horizonte de evaluación.

- CT_s: recuperación de capital de trabajo al final de horizonte.

Para el escenario base se adopta:

$$i = 10\%$$

Y:

$$T = 3\ años$$

La tasa de descuento de 10 % corresponde a un supuesto financiero de evaluación y no a una tasa institucional definida por la USM. Asimismo, el horizonte de tres años permite observar distintas ejecuciones del programa y la recuperación potencial de la inversión dentro de un período acotado, sin proyectar indefinidamente condiciones de costos, tecnología o mercado. Ambos parámetros se someten posteriormente a análisis de sensibilidad.

La interpretación del VAN se realiza de acuerdo con las siguientes condiciones:

$$VAN_s^{plan} > 0$$

cuando los flujos actualizados superan la inversión y la rentabilidad exigida;

$$VAN_s^{plan} = 0$$

cuando existe equilibrio financiero para la tasa utilizada; y

$$VAN_s^{plan} < 0$$

cuando los flujos proyectados no permiten recuperar la inversión y rentabilidad requerida dentro del horizonte considerado.

Además del caso planificado, el modelo puede calcular el VAN utilizando la cantidad máxima de versiones permitida por el calendario. Este resultado se utiliza como análisis complementario de capacidad y no como escenario principal, debido a que la capacidad de programar versiones adicionales no implica que exista demanda efectiva para ejecutarlas.

3.6.3.18 Período simple de recuperación

Como indicador complementario se utiliza el período simple de recuperación de la inversión. Cuando el flujo operacional anual es positivo y se mantiene constante bajo el escenario evaluado, puede estimarse mediante:

$$PB_s = \frac{I_{0,s}}{F_s^{op}}$$

Sujeto a:

$$F_s^{op} > 0$$

Donde PB_s representa la cantidad aproximada de años necesarios para recuperar la inversión inicial a partir del flujo operacional anual.

Cuando:

$$F_s^{op} \leq 0$$

no corresponde calcular un período simple de recuperación, debido a que la operación considerada no genera un flujo anual positivo capaz de recuperar la inversión.

Este indicador se utiliza únicamente como complemento, dado que no incorpora el valor temporal del dinero ni considera la magnitud de los flujos posteriores al momento de recuperación. Por este motivo, el VAN se mantiene como el principal indicador financiero de la evaluación (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008).

3.6.3.19 Factibilidad curricular

La evaluación económica se encuentra subordinada al cumplimiento de la estructura académica definida para el curso. Para cada escenario S y cada módulo m, se verifica que las horas asignadas sean suficientes para satisfacer los mínimos establecidos en el syllabus:

$$h_{sm} \geq h_m^{min}$$

y, para el componente práctico:

$$p_{sm} \geq p_m^{min}$$

manteniendo, además:

$$0 \leq p_{sm} \leq h_{sm}$$

Donde:

- h_{sm}: horas asignadas totales al módulo *m* en el escenario *s*.
- p_{sm}: horas prácticas asignadas.
- h_m^{min}: mínimo total requerido.
- p_m^{min}: mínimo práctico establecido.

A partir de estas condiciones se define:

$$Q_s = \begin{cases} 1, & si\ el\ escenario\ cumple\ todos\ los\ mínimos\ curriculares. \\ 0, & si\ al\ menos\ una\ condición\ no\ se\ cumple. \end{cases}$$

Esta restricción evita que una alternativa pueda ser seleccionada exclusivamente por presentar menores costos. El modelo exige primero el cumplimiento de la condición académica y posteriormente compara el desempeño económico de las alternativas admisibles.

3.6.3.20 Selección mediante Solver

Una vez calculados los indicadores de cada escenario y determinada su factibilidad curricular, se utiliza Solver como herramienta complementaria para la selección entre alternativas.

Para cada escenario *s* se define una variable binaria:

$$X_s = \begin{cases} 1, & si\ el\ escenario\ S\ es\ seleccionado. \\ 0, & si\ el\ escenario\ S\ no\ es\ seleccionado. \end{cases}$$

Con:

$$X_s \in \{0,1\}$$

La función objetivo utiliza el VAN correspondiente al caso planificado:

$$\max Z = \sum_{s \epsilon S} VAN_s^{plan} * X_s$$

sujeto a que se seleccione una única alternativa:

$$\sum_{s \epsilon S} X_s = 1$$

y a que dicha alternativa cumpla previamente los requerimientos curriculares:

$$X_s \leq Q_s \quad \forall_s \epsilon S$$

De esta manera, Solver únicamente puede seleccionar escenarios académicamente admisibles y, dentro de dicho conjunto, identifica aquel que presenta el mayor VAN bajo los parámetros utilizados en el caso planificado.

La utilización de Solver constituye una formalización de un problema de selección discreta y complementa la comparación directa de escenarios realizada mediante las fórmulas visibles

de la planilla. Su incorporación no sustituye el análisis académico ni determina automáticamente la conveniencia institucional de implementar el curso.

La matrícula y el precio no se incorporan como variables libres de decisión de Solver. Ambos permanecen como parámetros de escenario, debido a que permitir su ajuste automático exclusivamente para maximizar el VAN podría generar combinaciones matemáticamente favorables sin respaldo de demanda, mercado o condiciones institucionales.

Asimismo, maximizar el VAN no implica exigir que la alternativa seleccionada presente necesariamente:

$$VAN_s^{plan} > 0$$

Si todas las alternativas curricularmente factibles presentan resultados negativos bajo las condiciones analizadas, Solver identifica únicamente aquella con el mejor desempeño relativo. En tal caso, el resultado no constituye una recomendación automática de implementación y debe complementarse con los puntos de equilibrio, análisis de sensibilidad y condiciones alternativas de matrícula, precio y planificación.

En consecuencia, la formulación del modelo permite vincular de manera trazable el diseño curricular con la capacidad práctica, utilización de infraestructura, recursos humanos, inversión, estructura de costos, planificación anual y evaluación financiera. La selección final se interpreta como un insumo para la decisión y no como sustituto del juicio académico e institucional requerido para una eventual puesta en marcha.

3.6.4 Resultados del modelo técnico-económico

La aplicación del modelo técnico-económico permite comparar los escenarios de duración propuestos desde una perspectiva curricular, técnico-operacional y económico-financiera. Los resultados se analizan de manera secuencial, verificando primero la factibilidad curricular de cada alternativa y, posteriormente, sus requerimientos de capacidad, recursos, costos, inversión y desempeño financiero.

Esta secuencia responde a la lógica de decisión definida para el modelo: una alternativa no puede ser recomendada únicamente por presentar menores costos o un resultado financiero comparativamente favorable si no satisface previamente el alcance académico establecido para el curso. En consecuencia, la evaluación económica se aplica sobre aquellas configuraciones que cumplen los requerimientos curriculares definidos en el syllabus propuesto.

Los resultados corresponden a los parámetros y condiciones establecidos en las secciones anteriores. La matrícula, el precio, la cantidad anual de versiones, la tasa de descuento, el horizonte y los demás supuestos utilizados representan escenarios de evaluación y no deben interpretarse como demanda garantizada, disposición a pagar medida, precio comercial definitivo ni compromiso institucional de implementación.

3.6.4.1 Factibilidad curricular de los escenarios

La primera etapa del análisis consiste en verificar si los cuatro escenarios de duración permiten cubrir los requerimientos definidos para los ocho módulos del syllabus propuesto. La factibilidad no se determina únicamente mediante la cantidad total de horas, sino mediante el cumplimiento de las asignaciones mínimas establecidas para cada módulo y para sus actividades prácticas o aplicadas.

La verificación se realiza módulo a módulo mediante el parámetro de factibilidad curricular Q_s definido previamente. Por lo tanto, los valores agregados de horas que se presentan a continuación constituyen una síntesis del resultado de dicha comprobación y no sustituyen la evaluación de los requerimientos específicos de cada módulo.

Tabla 3-27: *Factibilidad curricular de los escenarios evaluados*

Escenario	Horas totales	Horas conceptuales	Horas prácticas o aplicadas	Proporción práctica	Cumplimiento de requerimientos curriculares
S1	24 h	12 h	12 h	50,0 %	**No**
S2	40 h	19 h	21 h	52,5 %	**Sí**
S3	60 h	25 h	35 h	58,3 %	**Sí**
S4	80 h	34 h	46 h	57,5 %	**Sí**

Fuente: *Elaboración propia a partir de los escenarios curriculares y las restricciones implementadas en el modelo técnico-económico.*

El escenario S1, de 24 horas, no satisface los requerimientos curriculares establecidos para la propuesta. La suma de las asignaciones mínimas definidas para los ocho módulos alcanza 40 horas, de las cuales 21 corresponden a actividades prácticas o aplicadas. Por lo tanto, una configuración de 24 horas no permite mantener íntegramente el alcance curricular definido.

La insuficiencia de S1 no se debe únicamente a su menor duración total. Al reducir la disponibilidad horaria deben disminuirse las asignaciones correspondientes a uno o más módulos y actividades prácticas, afectando la cobertura de contenidos y desempeños considerados necesarios para alcanzar el perfil de egreso propuesto. En consecuencia:

$$Q_{s1} = 0$$

y el escenario queda excluido de la selección final antes de realizar la optimización económica.

Este resultado permite evidenciar la función del filtro curricular dentro del modelo. Una alternativa podría presentar menores costos o incluso indicadores económicos comparativamente favorables debido a su menor carga horaria, pero ello no constituye fundamento suficiente para seleccionarla cuando no alcanza los requerimientos formativos establecidos.

El escenario S2, de 40 horas, corresponde a la primera configuración que permite cubrir íntegramente las asignaciones curriculares definidas para los ocho módulos. Su distribución corresponde a:

$$19\ horas\ teoricas + 21\ horas\ prácticas = 40\ horas$$

Por lo que:

$$Q_{s2} = 1$$

La componente práctica representa:

$$\frac{21}{40} * 100 = 52{,}5\%$$

de la duración total. Este porcentaje no corresponde a una meta definida previamente, sino al resultado de las asignaciones realizadas módulo a módulo según los contenidos, actividades y resultados de aprendizaje considerados.

Los escenarios S3 y S4, de 60 y 80 horas respectivamente, también satisfacen los requerimientos curriculares mínimos:

$$Q_{s3} = Q_{s4} = 1$$

Estas configuraciones permiten incrementar la profundidad de contenidos y la cantidad de actividades prácticas o aplicadas respecto del escenario de referencia de 40 horas. Sin embargo, una mayor duración no implica automáticamente una alternativa más conveniente, ya que también aumenta la utilización de recursos docentes, infraestructura y equipamiento y puede modificar las condiciones económicas de implementación.

En consecuencia, el conjunto inicial de alternativas:

$$S = \{S1, S2, S3, S4\}$$

se reduce, luego del filtro curricular, a:

$$S_{factible} = \{S2, S3, S4\}$$

La evaluación técnico-operacional y económico-financiera posterior se realiza únicamente sobre estas tres alternativas curricularmente admisibles.

3.6.4.2 Inversión y costos de puesta en marcha

Una vez determinada la factibilidad curricular de los escenarios, se analizaron los recursos económicos requeridos para la puesta en marcha de la propuesta. La evaluación distingue entre inversión técnica inicial, habilitación académica, capital de trabajo y costos asociados

a la operación de las distintas versiones, de acuerdo con la estructura definida previamente en el modelo.

La inversión técnica se dimensionó a partir de la configuración de ocho puestos de laboratorio y de la necesidad de utilización simultánea de cada recurso. Este criterio no supone adquirir ocho unidades de todos los instrumentos, sino ajustar su cantidad según la frecuencia y simultaneidad de uso durante las actividades prácticas.

Los componentes requeridos permanentemente en cada estación se dimensionaron con mayor disponibilidad, mientras que determinados instrumentos especializados, de utilización puntual o de mayor costo se configuraron para uso compartido. Esta decisión permite reducir duplicaciones de equipamiento que no incrementan proporcionalmente la capacidad formativa, manteniendo al mismo tiempo los recursos necesarios para desarrollar las actividades previstas.

En particular, se consideran ocho estructuras modulares, ocho conjuntos de propulsión y ocho controladoras de vuelo, debido a que estos elementos forman parte del trabajo principal desarrollado en los puestos. En cambio, determinados recursos de diagnóstico y apoyo se comparten entre estaciones, incluyendo cuatro multímetros, cuatro testers de batería, cuatro juegos de herramientas, dos estaciones de soldadura, dos fuentes de alimentación, dos microscopios digitales y un osciloscopio, entre otros.

La plataforma RPAS industrial se incorpora como un sistema profesional de referencia y no como banco permanente de desmontaje. Por esta razón se considera una única plataforma completa, mientras que las actividades que requieren manipulación repetitiva, reconocimiento de componentes, medición o diagnóstico se desarrollan principalmente mediante bancos modulares, componentes didácticos y material destinado específicamente a actividades formativas.

***Tabla 3-28**: Inversión técnica inicial considerada para la puesta en marcha*

Componente de inversión	Valor [CLP]	Participación	Criterio de dimensionamiento
Plataforma RPAS industrial de referencia	$8.990.000	71,7 %	Una plataforma profesional completa utilizada como referencia integrada para el análisis de arquitectura, sensores, navegación, comunicaciones, software y cargas útiles.
Componentes didácticos y repuestos	$804.340	6,4 %	Componentes modulares dimensionados para los ocho puestos; determinados recursos se comparten cuando no requieren utilización simultánea permanente.
Herramientas, diagnóstico y seguridad	$2.741.606	21,9 %	Recursos reutilizables dimensionados según su necesidad de uso: por puesto, compartidos entre pares de bancos o de utilización común.
Inversión técnica total	**$12.535.946**	**100 %**	Suma de plataforma RPAS, componentes didácticos y herramientas, instrumental y elementos de seguridad.

***Fuente:** Elaboración propia a partir de las cotizaciones y del dimensionamiento de equipamiento incorporados al modelo técnico-económico.*

***Nota:** Los precios corresponden a cotizaciones utilizadas para efectos de evaluación y no constituyen órdenes de compra ni precios institucionales definitivos. Los valores deberán actualizarse antes de una eventual implementación.*

La composición de la inversión muestra que la plataforma RPAS industrial concentra aproximadamente el 71,7 % de la inversión técnica inicial, mientras que los componentes didácticos representan un 6,4 % y las herramientas, recursos de diagnóstico y seguridad un 21,9 %. Por lo tanto, el principal desembolso técnico se encuentra concentrado en la adquisición de la plataforma profesional de referencia.

Este resultado indica que la estrategia de utilización compartida resulta especialmente pertinente para herramientas e instrumental, ya que permite evitar la adquisición de unidades adicionales cuando su utilización simultánea no resulta necesaria para alcanzar los resultados de aprendizaje. No obstante, esta lógica no busca reducir recursos esenciales para las actividades prácticas, sino dimensionarlos de acuerdo con su utilización efectiva.

La inversión técnica de:

$$I_{equip} = \$12.535.946$$

no corresponde todavía a la inversión inicial total del proyecto. De acuerdo con la formulación desarrollada previamente, a este monto se agregan la habilitación académica inicial y el capital de trabajo correspondiente al escenario evaluado:

$$I_{0,s} = I_{equip} + I_{hab} + CT_s$$

Esta distinción permite separar los recursos técnicos reutilizables de los requerimientos asociados a preparación académica y liquidez inicial.

Asimismo, el paso desde la matrícula base de 16 participantes hasta una cohorte de 20 participantes no requiere inversión fija incremental en nuevos puestos de trabajo:

$$I_{ext} = 0$$

Esto se debe a que los ocho puestos físicos ya se encuentran considerados en la configuración de referencia y el equipamiento técnico fue dimensionado sobre dicha infraestructura. Para matrículas entre 17 y 20 participantes se modifica únicamente la distribución de estudiantes entre los puestos existentes, incorporando un tercer integrante en las estaciones necesarias.

Por consiguiente, dentro de este rango no se requiere habilitar nuevos bancos ni duplicar la plataforma RPAS o el equipamiento técnico principal. El aumento de matrícula genera principalmente costos variables adicionales por participante, manteniéndose la estructura de inversión fija definida para la primera cohorte práctica.

Esta condición representa una ventaja operacional del diseño propuesto, ya que permite aumentar la utilización de la infraestructura desde:

$$N = 16$$

Hasta

$$N = 20$$

sin efectuar una inversión técnica incremental. Sin embargo, esta ventaja desaparece parcialmente cuando la matrícula supera los 20 participantes, debido a que se requiere repetir secuencialmente las actividades prácticas, aumentando las horas institucionales y los costos de ejecución aun cuando no sea necesario duplicar la infraestructura.

Finalmente, determinados recursos considerados en la configuración base presentan costo incremental igual a cero debido a que se asume su disponibilidad institucional. Entre ellos se

encuentran los ocho puestos físicos, computadores de laboratorio, puntos comunes de tierra para protección frente a descargas electrostáticas (ESD) y determinados componentes retirados de servicio que pueden emplearse como material didáctico. Estos elementos se consideran aportes institucionales disponibles para efectos del escenario base, y no recursos carentes de valor económico.

La disponibilidad efectiva de dichos recursos deberá verificarse antes de una eventual implementación. Si alguno de ellos no estuviera disponible o no cumpliera las condiciones técnicas requeridas, la inversión inicial deberá actualizarse incorporando el costo incremental correspondiente.

3.6.4.2.1 Costos de ejecución por escenario

Además de la inversión inicial, cada escenario genera costos de ejecución asociados a docencia, apoyo técnico, coordinación académica, utilización de sala y laboratorio, materiales, contingencia y comisión institucional. Para realizar una comparación homogénea se mantiene una matrícula base de:

$$N_{base} = 16$$

y el precio de evaluación de:

$$P = \$550.000\ /participante$$

El precio utilizado corresponde al techo comercial definido para evaluar la viabilidad de los escenarios y no representa disposición a pagar medida ni un arancel recomendado.

Con una matrícula de 16 participantes, todos los escenarios requieren un único bloque práctico. Por esta razón, las diferencias de costo se explican principalmente por la duración de cada alternativa y por las horas de docencia, apoyo técnico, sala y laboratorio asociadas a ella.

***Tabla 3-29**: Costos operacionales por versión según escenario, con matrícula base de 16 participantes*

Escenario	Cumple requerimientos curriculares	Costo operacional por versión [CLP]	Costo por participante [CLP]	Ingreso por versión [CLP]	Margen por versión [CLP]	Margen
S1 – 24 h	No	$5.028.597	$314.287	$8.800.000	$3.771.403	42,9 %
S2 – 40 h	Sí	**$7.762.508**	**$485.157**	$8.800.000	**$1.037.492**	**11,8 %**
S3 – 60 h	Sí	$11.327.057	$707.941	$8.800.000	-$2.527.057	-28,7 %
S4 – 80 h	Sí	$14.731.067	$920.692	$8.800.000	-$5.931.067	-67,4 %

***Fuente:** Elaboración propia a partir de los resultados del modelo técnico-económico.*

***Nota.** El costo por versión incorpora docencia, apoyo técnico, sala, laboratorio, coordinación académica, costos variables por participante, contingencia de 5 % y comisión institucional de 20 %.*

Los resultados muestran una relación directa entre duración y costo de ejecución. A medida que aumenta la carga horaria del curso, se incrementan principalmente los costos asociados a docencia, apoyo técnico y utilización de infraestructura.

El escenario S1 presenta el menor costo y el mayor margen por cohorte; sin embargo, no satisface los requerimientos curriculares definidos y, por tanto, no forma parte del conjunto de alternativas admisibles para la selección final.

Entre los escenarios curricularmente factibles, S2 es el único que presenta un margen operacional positivo por versión bajo las condiciones del caso base:

$$M_{S2} = \$1.037.492$$

equivalente aproximadamente a:

$$11{,}8\%$$

del ingreso por cohorte.

En cambio, S3 y S4 presentan costos de ejecución superiores al ingreso generado con una matrícula de 16 participantes y un precio de $550.000, obteniéndose:

$$M_{S3} = -\$2.527.057$$

Y:

$$M_{S4} = -\$5.931.067$$

Esto indica que, bajo las condiciones del caso base, ambos escenarios presentan déficit operacional incluso antes de considerar la recuperación de la inversión inicial.

El margen positivo observado en S2 tampoco permite concluir, por sí solo, que la alternativa sea financieramente conveniente. El resultado únicamente indica que una cohorte puede cubrir sus costos directos de ejecución bajo las condiciones utilizadas. La evaluación completa debe incorporar además los costos recurrentes anuales, la inversión inicial, el capital de trabajo, el VAN, los puntos de equilibrio y el análisis de sensibilidad.

3.6.4.3 Resultados económico-financieros del caso base

Una vez determinados los costos de ejecución, se evalúa el comportamiento económico-financiero de los escenarios bajo un conjunto común de condiciones de referencia. Esta comparación tiene como propósito observar el desempeño relativo de las alternativas sin interpretar los parámetros utilizados como una proyección de demanda o como una definición anticipada del precio final.

El caso base considera:

$$N_{base} = 16\ participantes$$
$$P = \$550.000/participantes$$
$$V_{obj} = 3\ versiones/año$$

La matrícula de 16 participantes corresponde a la configuración práctica preferente de los ocho puestos del laboratorio. El precio se utiliza como techo comercial de evaluación, mientras que las tres versiones anuales constituyen un supuesto común de planificación utilizado para comparar los escenarios bajo una misma frecuencia de ejecución.

Bajo estas condiciones, el ingreso anual considerado para cada escenario corresponde a:

$$IT_{año} = 550.000 * 16 * 3 = \$26.400.000$$

La cantidad de tres versiones no representa una proyección de ventas. Su utilización evita que los escenarios de menor duración obtengan una ventaja exclusivamente por admitir una mayor cantidad potencial de ejecuciones dentro del calendario.

***Tabla 3-30**: Resultados económico-financieros del caso base*

Indicador	S1 – 24 h	S2 – 40 h	S3 – 60 h	S4 – 80 h
Cumplimiento curricular	No	Sí	Sí	Sí
Versiones planificadas/año	3	3	3	3
Ingreso anual [CLP]	$26.400.000	$26.400.000	$26.400.000	$26.400.000
Costo anual de versiones [CLP]	$15.085.791	**$23.287.523**	$33.981.170	$44.193.201
Mantenimiento RPAS anual [CLP]	$449.500	$449.500	$449.500	$449.500
Marketing anual [CLP]	$600.000	$600.000	$600.000	$600.000
Flujo operacional anual [CLP]	$10.264.709	**$2.062.977**	-$8.630.670	-$18.842.701
Capital de trabajo [CLP]	$1.344.608	**$2.028.085**	$2.919.222	$3.770.225
Inversión inicial [CLP]	$14.280.554	**$14.964.031**	$15.855.168	$16.706.171
Acumulado al cierre del año 1 [CLP]	-$4.015.845	**-$12.901.055**	-$24.485.838	-$35.548.872
Payback simple [años]	1,39	**7,25**	No recupera*	No recupera*
VAN a 3 años [CLP]	$12.256.482	**-$8.309.984**	-$35.125.112	-$60.732.554

***Fuente:** Elaboración propia a partir del modelo técnico-económico desarrollado.*

***Nota.** El caso base considera 16 participantes, un precio de evaluación de $550.000 por participante y tres versiones anuales. La inversión inicial incluye equipamiento técnico, habilitación académica y capital de trabajo. El modelo considera recuperación del capital de trabajo al término del horizonte y no incorpora valor residual del equipamiento.*

** El período simple de recuperación no se calcula cuando el flujo operacional anual es negativo.*

3.6.4.3.1 Interpretación de los resultados

Los resultados evidencian una diferencia entre sostenibilidad operacional y desempeño financiero del proyecto completo.

S1 y S2 presentan flujos operacionales anuales positivos bajo las condiciones del caso base. Sin embargo, S1 no cumple los requerimientos curriculares definidos y permanece excluido del conjunto de alternativas admisibles, independientemente de su resultado económico.

Entre los escenarios curricularmente factibles, S2 presenta:

$$F_{S2}^{op} = \$2.062.977$$

por lo que sus ingresos anuales permiten cubrir los costos recurrentes considerados en el caso base. No obstante, su VAN a tres años corresponde a:

$$VAN_{S2}^{plan} = -\$8.309.984$$

y su período simple de recuperación estimado supera el horizonte de evaluación. Por tanto, un flujo operacional positivo no resulta suficiente para recuperar la inversión inicial y alcanzar el rendimiento representado por la tasa de descuento dentro de los tres años considerados.

S3 y S4 presentan además flujos operacionales anuales negativos:

$$F_{S3}^{op} = -\$8.630.670$$

$$F_{S4}^{op} = -\$18.842.701$$

lo que indica que, bajo una matrícula de 16 participantes, un precio de $550.000 y tres versiones anuales, sus dificultades económicas aparecen durante la propia operación recurrente y no únicamente al considerar la recuperación de la inversión.

En consecuencia, los resultados del caso base no determinan todavía la alternativa final de implementación. Permiten establecer que las configuraciones curricularmente factibles presentan comportamientos económicos diferentes y que ninguna debe recomendarse únicamente a partir del caso base. La decisión requiere incorporar los puntos de equilibrio, el efecto de cambios en matrícula y precio, la sensibilidad de los resultados y la comparación formal de los escenarios admisibles mediante Solver.

3.6.4.3.2 Inversión inicial y capital de trabajo

La inversión inicial presenta diferencias entre escenarios a pesar de utilizar el mismo equipamiento técnico. Esto se debe a que el capital de trabajo depende de los costos operacionales anuales de cada alternativa.

La inversión inicial se calcula mediante:

$$I_{0,S} = I_{equip} + I_{hab} + CT_S$$

Donde son comunes a los cuatros escenarios:

$$I_{equip} = \$12.535.946$$

$$I_{hab} = \$400.000$$

Por lo tanto, las diferencias entre las inversiones iniciales se originan en el capital de trabajo CT_S, cuyo valor aumenta cuando los costos operacionales anuales son mayores.

Para el escenario S2, bajo las condiciones del caso base, se obtiene:

$$CT_{S2} = \$2.028.085$$

Por lo que:

$$I_{0,S2} = 12.535.946 + 400.000 + 2.028.085$$

$$I_{0,S2} = \$14.964.031$$

El capital de trabajo representa el requerimiento de liquidez correspondiente al período de desfase de un mes definido en el modelo. Como se indicó previamente, este valor constituye un supuesto de evaluación y no una política de cobranza de la Universidad. Su recuperación se incorpora al término del horizonte de evaluación.

3.6.4.3.3 Diferencia entre sostenibilidad operacional y resultado financiero

El escenario S2 permite observar una diferencia relevante entre la capacidad de sostener la operación recurrente y la recuperación de la inversión inicial.
Bajo las condiciones del caso base:

$$F_{S2}^{op} = \$2.062.977 > 0$$

Sin embargo:

$$VAN_{S2}^{plan} = -\$8.309.984$$

Esto indica que los ingresos generados por tres versiones anuales permiten cubrir los costos recurrentes considerados en la operación, pero los flujos obtenidos durante el horizonte de tres años no resultan suficientes para recuperar la inversión inicial y alcanzar el rendimiento representado por la tasa de descuento utilizada.

De manera complementaria, el período simple de recuperación estimado para S2 corresponde aproximadamente a:

$$PB_{S2} = 7{,}25\ años$$

valor significativamente superior al horizonte base de tres años.

Por lo tanto, bajo las condiciones del caso base, sostenibilidad operacional y conveniencia financiera no resultan equivalentes. Esta distinción justifica analizar posteriormente cómo varían los resultados al modificar matrícula, precio y otras condiciones de implementación.

3.6.4.3.4 Comparación entre las alternativas factibles

La comparación económico-financiera se realiza únicamente entre los escenarios que superan previamente el filtro curricular: S2, S3 y S4.

Bajo las condiciones del caso base se obtiene:

$$VAN_{S2}^{plan} = -\$8.309.984$$

$$VAN_{S3}^{plan} = -\$35.125.112$$

$$VAN_{S4}^{plan} = -\$60.732.554$$

Por tanto:

$$VAN_{S2}^{plan} > VAN_{S3}^{plan} > VAN_{S4}^{plan}$$

Ninguno de los tres escenarios curricularmente factibles presenta un VAN positivo bajo una matrícula de 16 participantes, un precio de $550.000 y tres versiones anuales. No obstante, Bajo las condiciones del caso base, S2 presenta el VAN menos negativo entre las alternativas curricularmente factibles, mientras que S3 y S4 presentan resultados inferiores. Esta comparación constituye un antecedente para las etapas posteriores de análisis.

Este resultado no constituye todavía la selección definitiva de una alternativa de implementación. Su función es identificar las configuraciones que justifican un análisis posterior de sensibilidad y determinar si cambios razonables en matrícula, precio o utilización de capacidad permiten modificar la evaluación obtenida.

3.6.4.4 Efecto de la matrícula y de la capacidad práctica sobre la rentabilidad

Una vez identificados S2, S3 y S4 como escenarios curricularmente factibles, se profundiza el análisis del escenario S2 con el propósito de estudiar el efecto específico de la matrícula y de la restricción de capacidad práctica. S2 se utiliza como referencia debido a que corresponde a la configuración de menor duración que satisface la cobertura curricular definida. Este análisis no constituye todavía la selección final entre las alternativas factibles.

Para esta evaluación se mantiene constante la estructura académica de S2:

$$H_{total} = 40\ h$$

$$H_{teo} = 19\ h$$

$$H_{prac} = 21\ h$$

Asimismo, se mantienen tres versiones anuales y un precio de evaluación de:

$$P = \$550.000/participante$$

La matrícula se modifica dentro del rango definido para la primera implementación, hasta un máximo de 32 participantes. Estas variaciones corresponden a escenarios de sensibilidad.

La organización práctica mantiene la lógica definida previamente. Hasta 20 participantes se utiliza un único bloque práctico; desde 21 participantes se requiere un segundo bloque secuencial:

$$G(N) = \begin{cases} 1, & N \leq 20 \\ 2, & 21 \leq N \leq 32 \end{cases}$$

Este umbral produce un comportamiento económico no lineal. Mientras la matrícula aumenta dentro de un único bloque, los incrementos de costo corresponden principalmente a costos variables por participante. Al superar los 20 participantes deben repetirse las 21 horas prácticas de S2, incrementándose las horas docentes, el apoyo técnico y la utilización del laboratorio.

***Tabla 3-31**: Sensibilidad económica del escenario S2 según matrícula*

Matrícula	**Grupos prácticos**	**Costo por versión [CLP]**	**Precio de equilibrio operacional [CLP/participante]**	**Flujo operacional anual a $550.000 [CLP]**	**VAN a 3 años a $550.000 [CLP]**
8	1	$7.460.108	$976.243	-$10.229.823	-$38.861.557
12	1	$7.611.308	$663.428	-$4.083.423	-$23.585.770
16	1	$7.762.508	$507.021	$2.062.977	-$8.309.984
20	1	$7.913.708	$413.177	$8.209.377	$6.965.803
21	2	$12.031.415	$589.583	-$2.493.745	-$19.907.278
24	2	$12.144.815	$520.610	$2.116.055	-$8.450.438
28	2	$12.296.015	$451.637	$8.262.455	$6.825.348
32	2	$12.447.215	$399.908	$14.408.855	$22.101.135

***Fuente:** Elaboración propia a partir del análisis de sensibilidad del modelo técnico-económico.*

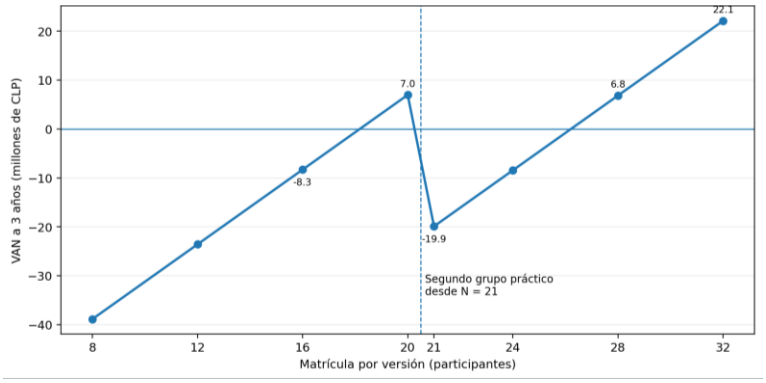
***Nota.** El análisis mantiene el escenario S2 de 40 horas, tres versiones anuales y un precio de evaluación de $550.000 por participante. Las matrículas corresponden a escenarios de análisis y no constituyen una estimación de demanda.*

Los resultados muestran que la utilización de la capacidad disponible tiene una incidencia significativa sobre el desempeño financiero. Mientras el curso opera dentro de un único bloque práctico, el aumento de matrícula distribuye los costos fijos y de infraestructura entre un mayor número de participantes, reduciendo progresivamente el precio de equilibrio.

Con 16 participantes, S2 presenta flujo operacional positivo, pero VAN negativo. Al aumentar la matrícula dentro del mismo bloque, el resultado financiero mejora y, en los valores mostrados en la tabla, una matrícula de 20 participantes permite obtener un VAN positivo.

Al superar los 20 participantes se produce un cambio discreto. La apertura de un segundo bloque práctico incrementa las horas institucionales y eleva nuevamente el costo de ejecución, por lo que el resultado financiero disminuye de forma abrupta entre 20 y 21 participantes. Posteriormente, a medida que aumenta la matrícula dentro del segundo tramo, los ingresos vuelven a absorber progresivamente dicho costo adicional.

Este comportamiento evidencia que la capacidad práctica no funciona únicamente como una restricción física, sino también como una variable relevante para la sostenibilidad económica del curso. En consecuencia, la relación entre matrícula y resultado financiero debe analizarse considerando los umbrales de capacidad y no suponiendo una evolución lineal de los costos.



Figuras 3-3: *Sensibilidad del VAN del escenario S2 según matrícula*

Fuente: *Elaboración propia a partir del modelo técnico-económico.*

Nota: *La línea discontinua marca el cambio de capacidad entre uno y dos grupos prácticos. El salto entre 20 y 21 participantes refleja la repetición secuencial de las 21 horas prácticas del escenario S2.*

3.6.4.4.1 Comportamiento dentro de una única cohorte.

Entre 8 y 20 participantes se mantiene un único bloque práctico. Dentro de este rango, el aumento de matrícula incrementa principalmente los costos variables por participante, mientras que una proporción importante de los costos asociados a docencia, coordinación e infraestructura se distribuye entre un mayor número de estudiantes.

En el caso base de 16 participantes, el precio de equilibrio operacional anual del escenario S2 corresponde aproximadamente a:

$$P_{eq,16} = \$507.021/participante$$

Al aumentar la matrícula hasta 20 participantes, dicho precio disminuye a:

$$P_{eq,20} = \$413.177/participante$$

La reducción corresponde aproximadamente a $18{,}5\%$.

Con 20 participantes y un precio de evaluación de $550.000, el flujo operacional anual alcanza:

$$F_{op,20} = \$8.209.376$$

y el VAN a tres años pasa a:

$$VAN_{20} = \$6.965.802$$

Estos resultados muestran el efecto favorable de utilizar una mayor proporción de la capacidad disponible dentro del mismo bloque práctico. Sin embargo, los valores corresponden a escenarios de evaluación y no implican que una matrícula de 20 participantes constituya demanda esperada o garantizada.

3.6.4.4.2 Umbrales de equilibrio dentro del primer bloque

La búsqueda discreta realizada para valores enteros de matrícula permite identificar distintos umbrales económicos dentro del primer bloque práctico.

A un precio de evaluación de $550.000 por participante, el flujo operacional anual pasa a ser positivo desde aproximadamente:

$$N = 15\ participantes$$

Por su parte, la recuperación de la inversión dentro del horizonte y bajo la tasa de descuento utilizada requiere una matrícula mayor. El VAN pasa de negativo a positivo entre 18 y 19 participantes, obteniéndose:

$$VAN_{18} \approx -\$672.091 \quad VAN_{19} \approx \$3.146.855$$

Por lo tanto, dentro del primer bloque práctico pueden distinguirse dos umbrales:

$$N_{eq,op} = 15$$

para alcanzar equilibrio operacional anual, y aproximadamente:

$$N_{VAN \geq 0} = 19$$

para alcanzar un VAN no negativo bajo las condiciones del escenario evaluado.

Esta diferencia confirma que cubrir la operación recurrente no equivale a recuperar la inversión inicial dentro del horizonte considerado.

3.6.4.4.3 Efecto de superar los 20 participantes

El comportamiento cambia de manera importante al pasar de 20 a 21 participantes. Con:

$$N = 20$$

se utiliza un único grupo práctico y el costo por versión de S2 es:

$$C_{ver,20} = \$7.913.708$$

En cambio, con:

$$N = 21$$

se requiere un segundo grupo práctico secuencial y el costo por versión aumenta a:

$$C_{ver,21} = \$12.031.415$$

El incremento asociado exclusivamente a repetir las 21 horas prácticas puede expresarse mediante:

$$\Delta C_{grupo2} = H_{prac}(C_{doc} + C_{ayud} + C_{lab})(1 + \lambda)(1 + \tau_{EC})$$

Con los parámetros utilizados:

$$\Delta C_{grupo2} = 21(40.000 + 6.610 + 107.581{,}5)(1 + 0{,}05)(1 + 0{,}20)$$

obteniéndose:

$$\Delta C_{grupo2} = \$4.079.907$$

Este monto representa el costo adicional de repetir el componente práctico considerando docencia, apoyo técnico, laboratorio, contingencia y comisión institucional. La diferencia total entre una matrícula de 20 y 21 participantes incorpora, además, el costo variable correspondiente al participante adicional.

La utilización de capacidad extendida entre 17 y 20 participantes permite, por tanto, postergar este salto de costos sin requerir nuevos bancos de trabajo ni duplicar el equipamiento técnico principal. Este resultado constituye una ventaja de utilización de capacidad, pero no modifica el criterio pedagógico previamente definido: el tercer integrante se utiliza únicamente en los puestos necesarios y no como configuración estándar de las ocho estaciones.

3.6.4.4.4 Discontinuidad económica entre 20 y 21 participantes

La apertura del segundo grupo se refleja directamente en los indicadores económicos. Con 20 participantes se obtiene:

$$P_{eq,20} = \$413.177$$

Y:

$$VAN_{20} \approx +\$6.965.802$$

Mientras que con 21 participantes:

$$P_{eq,21} = \$589.583$$

Y:

$$VAN_{21} \approx -\$19.907.279$$

En consecuencia, incorporar un participante adicional al superar el límite del primer bloque produce inicialmente un deterioro significativo del resultado económico, debido a que obliga a repetir el componente práctico completo.

Este comportamiento evidencia una economía de capacidad por tramos: los costos no aumentan de manera continua con la matrícula, sino que presentan saltos cuando se supera una restricción operacional.

3.6.4.4.5 Recuperación del resultado después de abrir el segundo grupo

Una vez abierto el segundo bloque práctico, el aumento posterior de matrícula permite distribuir sus costos adicionales entre un mayor número de participantes.
A un precio de $550.000 por participante, el flujo operacional anual vuelve a ser positivo desde aproximadamente:

$$N = 23\ participante$$

Sin embargo, en ese nivel todavía no se recupera suficientemente la inversión inicial dentro del horizonte evaluado.

El VAN vuelve a ser positivo desde aproximadamente:

$$N = 27\ participantes$$

Donde se obtiene:

$$VAN_{27} \approx \$3.006.401$$

y continúa aumentando conforme se utiliza una mayor proporción de la capacidad definida para la primera implementación. Para 32 participantes:

$$VAN_{32} \approx \$22.101.135$$

Por lo tanto, el análisis identifica dos zonas de utilización especialmente relevantes para S2: una primera correspondiente a la utilización elevada de un único bloque práctico, y una segunda asociada a una utilización suficiente de los dos bloques secuenciales como para absorber el costo de su repetición.

3.6.4.4.6 Implicancias de la sensibilidad por matrícula

Los resultados muestran que la matrícula constituye una variable crítica para el desempeño económico de la propuesta. No obstante, su efecto depende de la capacidad práctica disponible y no puede analizarse suponiendo una relación lineal entre participantes, costos y rentabilidad.

Dentro de un mismo bloque, una mayor utilización de capacidad mejora progresivamente los indicadores. Al superar el umbral de 20 participantes se produce un aumento discreto de

costos y, posteriormente, el resultado vuelve a mejorar a medida que se utiliza una mayor proporción del segundo bloque.

Estos resultados no constituyen una estimación de demanda ni permiten asumir que las matrículas requeridas serán alcanzadas. Su función es identificar las condiciones bajo las cuales la estructura propuesta puede cubrir sus costos operacionales o recuperar la inversión, proporcionando antecedentes para la evaluación posterior de precio, sensibilidad financiera y selección de la configuración de puesta en marcha.

3.6.4.5 Análisis de puntos de equilibrio

Además de evaluar el Valor Actual Neto, resulta necesario determinar las condiciones mínimas bajo las cuales el escenario S2 puede sostener su operación. Para ello se analizan el precio de equilibrio operacional anual y la matrícula de equilibrio, diferenciándolos de la recuperación de la inversión inicial.

El precio de equilibrio operacional anual se determina mediante:

$$P_{eq,op}(N) = \frac{C_{op,año}(N)}{N * V_{plan}}$$

Donde $C_{op,año}$(N) incorpora los costos de las versiones planificadas, la reserva anual de mantenimiento de la plataforma RPAS y el presupuesto anual de difusión.

Para la matrícula base de 16 participantes se obtiene aproximadamente:

$$C_{op,año}(16) = \$24.337.023$$

Y, considerando tres versiones anuales:

$$P_{eq,op}(16) = \frac{24.337.023}{16 * 3}$$

$$P_{eq,op}(16) \approx \$507.021\ /participante$$

Este valor representa el precio necesario para cubrir la operación anual bajo una matrícula de 16 participantes. No incorpora la recuperación completa de la inversión inicial ni corresponde automáticamente al precio recomendado del curso.

3.6.4.5.1 Contraste con referencias de precio

El benchmark incorporado al modelo considera referencias privadas de capacitación en mantenimiento de drones y cursos técnicos de educación continua, cuyas características difieren en duración, profundidad y alcance respecto de la propuesta desarrollada.

Dentro de las referencias técnicas utilizadas para posicionamiento se observan valores de hasta aproximadamente $490.000 por participante. En este contexto, el precio de equilibrio operacional obtenido para una matrícula de 16 participantes:

$$P_{eq,op}(16) \approx \$507.021$$

se sitúa aproximadamente:

$$\$17.021$$

por encima de dicha referencia superior, equivalente a una diferencia cercana al 3,5 %, aunque permanece por debajo del techo comercial de $550.000 utilizado en la evaluación.

Este resultado muestra que una cohorte de 16 participantes puede sostener operacionalmente el programa dentro del rango de evaluación utilizado, pero requiere un precio superior a algunas referencias de cursos técnicos observados. La comparación debe interpretarse únicamente como un criterio de posicionamiento, debido a que los programas considerados presentan diferencias de duración, contenidos, infraestructura y nivel de especialización.

3.6.4.5.2 Efecto de utilizar la capacidad de 20 participantes.

Cuando la matrícula aumenta hasta 20 participantes sin requerir un segundo bloque práctico, el costo operacional anual corresponde aproximadamente a:

$$C_{op,año}(20) = \$24.790.623$$

Por tanto:

$$P_{eq,op}(20) = \frac{24.790.623}{20 * 3}$$

$$P_{eq,op}(20) = \$413.177\ /participante$$

En comparación con la matrícula base, el precio de equilibrio disminuye aproximadamente:

$$\frac{507.021 - 413.177}{507.021} * 100 = 18{,}5\%$$

Este resultado evidencia el efecto de una mayor utilización de la capacidad disponible: incrementar la matrícula desde 16 hasta 20 participantes permite distribuir una proporción mayor de los costos entre los integrantes de la cohorte sin realizar inversión adicional en puestos de trabajo ni repetir el componente práctico.

El valor de equilibrio obtenido con 20 participantes se encuentra, además, dentro del rango de referencias técnicas utilizado para contextualizar el posicionamiento comercial de la propuesta. No obstante, continúa correspondiendo a un precio mínimo de operación y no a una recomendación automática de arancel.

3.6.4.5.3 Matrícula de equilibrio al precio de evaluación.

Manteniendo el precio de evaluación en:

$$P = \$550.000/participante$$

el modelo busca el menor número entero de participantes que permita obtener un flujo operacional anual no negativo.

Los resultados muestran que con 14 participantes la operación todavía presenta un déficit, mientras que con 15 participantes pasa a generar un flujo operacional positivo. Por lo tanto:

$$N_{eq,op} = 15\ participantes$$

Este valor corresponde a la matrícula de equilibrio operacional bajo el precio de evaluación considerado y no debe interpretarse como matrícula esperada, objetivo comercial ni estimación de demanda.

De esta forma, para el primer bloque práctico se distinguen tres referencias diferentes:

$$N = 15$$

como matrícula aproximada de equilibrio operacional;

$$N = 16$$

como matrícula base definida por la configuración preferente de dos participantes en cada uno de los ocho puestos; y

$$N = 20$$

como capacidad máxima considerada para una única cohorte práctica.

Estas tres cifras responden a criterios diferentes y no deben confundirse.

3.6.4.5.4 Recuperación de la inversión durante el primer año.

Como condición complementaria y más exigente, se estima el precio que permitiría cubrir la operación anual y recuperar la totalidad de la inversión inicial al cierre del primer año:

$$P_{eq,año1}(N) = \frac{C_{op.año}(N) + I_{0,N}}{N * V_{plan}}$$

Para la matrícula base de 16 participantes:

$$P_{eq,año1}(16) \approx \$818.772/participante$$

mientras que para 20 participantes:

$$P_{eq,año1}(20) \approx \$663.208/participante$$

Ambos valores superan el techo comercial de $550.000 utilizado en la evaluación.

Asimismo, manteniendo dicho precio, ninguna matrícula comprendida dentro del límite establecido para la primera implementación:

$$N \leq 32$$

permite recuperar completamente la inversión al cierre del primer año.

Este resultado no implica por sí mismo que la propuesta sea inviable. La inversión en equipamiento se destina a múltiples ejecuciones y períodos de utilización, por lo que exigir su recuperación completa durante el primer año constituye una condición más restrictiva que el criterio financiero principal utilizado en la memoria. La evaluación de conveniencia

permanece basada en los flujos del horizonte de tres años, el VAN y el análisis de sensibilidad.

***Tabla 3-32**: Principales resultados del análisis de puntos de equilibrio*

Indicador	**Resultado**	**Naturaleza del valor**	**Interpretación**
Matrícula base	16 participantes	Parámetro de escenario	Corresponde a 8 puestos × 2 participantes; no representa demanda esperada.
Precio utilizado para evaluación	$550.000/participante	Techo comercial de evaluación	No corresponde a disposición a pagar medida ni al precio final recomendado.
Versiones anuales	3	Supuesto de planificación	Frecuencia común utilizada para comparar los escenarios.
Precio de equilibrio operacional, N=16	**$507.021/participante**	Resultado del modelo	Precio aproximado necesario para cubrir la operación anual con matrícula base.
Matrícula de equilibrio a $550.000	**15 participantes**	Resultado del modelo	Menor matrícula entera que permite cubrir los costos operacionales anuales.
Capacidad máxima de un bloque	20 participantes	Restricción operacional	Umbral adoptado antes de requerir un segundo bloque práctico.
Precio de equilibrio operacional, N=20	**$413.177/participante**	Resultado del modelo	Refleja la mayor absorción de costos al utilizar la capacidad del primer bloque.
Precio para recuperar inversión en año 1, N=16	**$818.772/participante**	Indicador complementario	Supera ampliamente el techo comercial utilizado en la evaluación.
Precio para recuperar inversión en año 1, N=20	**$663.208/participante**	Indicador complementario	Mejora respecto de N=16, pero permanece sobre $550.000.
Recuperación total durante año 1 a $550.000 y N≤32	**No se alcanza**	Resultado del modelo	La inversión requiere un horizonte superior a un año bajo las condiciones analizadas.

***Fuente:** Elaboración propia a partir del modelo técnico-económico desarrollado.*

***Nota.** Los resultados corresponden a escenarios de evaluación y no constituyen pronósticos de demanda, disposición a pagar ni recomendaciones definitivas de precio.*

3.6.4.6 Análisis de sensibilidad y robustez de los resultados.

Debido a que la evaluación técnico-económica incorpora parámetros que corresponden a supuestos de modelación y no, en todos los casos, a condiciones institucionales definitivas,

se realiza un análisis de sensibilidad para determinar en qué medida los resultados dependen de variaciones en las principales variables del modelo. El propósito no consiste en modificar los parámetros hasta obtener artificialmente un resultado favorable, sino en identificar qué condiciones presentan mayor incidencia sobre la viabilidad de la propuesta y verificar la robustez de las conclusiones obtenidas (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008).

Para profundizar el análisis de sensibilidad se utiliza el escenario S2 de 40 horas como escenario de referencia. Esta elección responde a que corresponde a la configuración de menor duración que satisface íntegramente los requerimientos curriculares definidos, lo que permite analizar de manera acotada el efecto de variaciones en los principales parámetros del modelo. Su utilización en esta etapa no constituye la selección de la alternativa de implementación, la cual se determina posteriormente mediante la comparación conjunta de los escenarios factibles, los resultados de sensibilidad y la formulación de selección mediante Solver.

Las condiciones de referencia corresponden a:

$$N = 16$$

$$P = \$550.000/participante$$

$$V_{plan} = 3\ versiones/año$$

$$i = 10\%$$

$$T = 3\ años$$

Obteniéndose:

$$VAN_{base} = -\$8.309.984$$

3.6.4.6.1 Sensibilidad a tasa de descuento y al horizonte de evaluación

La tasa de descuento base de 10 % corresponde a un supuesto financiero utilizado para la evaluación y no a una tasa institucional de la Universidad. Para analizar su incidencia se

consideran escenarios de 5 % y 15 %, equivalentes a una variación de cinco puntos porcentuales respecto del caso base.

De forma complementaria, el horizonte de tres años se amplía a cinco años con el propósito de observar el efecto de prolongar la utilización de la inversión inicial sin modificar la matrícula, el precio ni la frecuencia anual.

***Tabla 3-33**: Sensibilidad del VAN de S2 frente a tasa de descuento y horizonte*

Horizonte	VAN a 5 % [CLP]	VAN a 10 % [CLP]	VAN a 15 % [CLP]
3 años	-$7.594.098	**-$8.309.984**	-$8.920.293
5 años	-$4.443.365	-$5.884.446	-$7.040.297

***Fuente:** Elaboración propia a partir del modelo técnico-económico desarrollado.*

***Nota.** Las tasas de 5 % y 15 % se utilizan como escenarios de sensibilidad alrededor de la tasa base de 10 %. No representan tasas institucionales de la USM.*

Una menor tasa de descuento mejora el VAN, mientras que una mayor exigencia financiera lo reduce. Del mismo modo, ampliar el horizonte a cinco años mejora el resultado debido a que permite incorporar dos años adicionales de flujo operacional.

Sin embargo, ninguna de las combinaciones evaluadas permite obtener un VAN positivo manteniendo una matrícula de 16 participantes. Por tanto, el resultado negativo del caso base no se explica exclusivamente por la tasa de descuento ni por la elección de un horizonte de tres años.

Este resultado fortalece la robustez del diagnóstico financiero: modificar únicamente los parámetros financieros no resuelve la brecha existente entre la inversión inicial y los flujos generados bajo la matrícula base.

3.6.4.6.2 Sensibilidad a la frecuencia anual.

La planificación base considera tres versiones anuales:

$$V_{obj} = 3$$

mientras que, para el escenario S2 y una matrícula que no requiere repetir el bloque práctico, la estructura temporal permite programar como máximo:

$$V_{max} = 5\ versiones/año$$

Esta capacidad máxima se utiliza únicamente como escenario de sensibilidad, debido a que disponer de espacio en el calendario no implica que exista demanda para ejecutar cinco cohortes anuales.

Manteniendo 16 participantes y un precio de $550.000, la utilización de cinco versiones incrementa el flujo operacional anual aproximadamente a:

$$F_{S2,5V}^{op} = \$4.137.961$$

y mejora el VAN a tres años desde:

$$-\$8.309.984$$

Hasta aproximadamente:

$$VAN_{S2,5V} = -\$3.471.541$$

Aunque el resultado mejora de manera relevante, permanece negativo. En consecuencia, utilizar toda la capacidad temporal del calendario tampoco resulta suficiente para recuperar la inversión bajo una matrícula de 16 participantes.

Este resultado debe interpretarse con cautela, ya que cinco versiones representan capacidad potencial de programación y no una previsión de ventas. Por ello, se mantiene la planificación de tres versiones como condición base de comparación.

3.6.4.6.3 Sensibilidad al precio.

El precio constituye otra variable con incidencia directa sobre el resultado económico. No obstante, su análisis debe mantenerse dentro de valores comercialmente razonables y no utilizarse como una variable libre destinada únicamente a transformar un VAN negativo en positivo.

Para una matrícula de 16 participantes y tres versiones anuales se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3-34: *Sensibilidad económica de S2 frente al precio, con matrícula de 16 participantes.*

Precio por participante	Flujo operacional anual [CLP]	VAN a 3 años [CLP]
$400.000	-$5.137.023	-$26.215.318
$450.000	-$2.737.023	-$20.246.873
$490.000	-$817.023	-$15.472.117
$500.000	-$337.023	-$14.278.428
$550.000	**$2.062.977**	**-$8.309.984**

Fuente: *Elaboración propia a partir del modelo técnico-económico.*

Nota. *El análisis considera 16 participantes, tres versiones anuales, tasa de descuento de 10 % y horizonte de tres años. Los precios corresponden a escenarios de sensibilidad y no representan una estimación de disposición a pagar.*

Los resultados muestran que aumentar el precio mejora progresivamente el desempeño económico. Sin embargo, incluso el techo comercial de $550.000 utilizado en la evaluación mantiene un VAN negativo cuando la matrícula permanece en 16 participantes.

Asimismo, la referencia de $490.000 utilizada como límite superior de parte del benchmark analizado no alcanza a cubrir completamente la operación anual bajo la matrícula base. Esto evidencia que la viabilidad no puede fundamentarse exclusivamente en aumentar el precio y refuerza la importancia de analizar conjuntamente la utilización de capacidad.

En consecuencia, el precio no debe actuar como mecanismo artificial para compensar una utilización insuficiente de la infraestructura disponible.

3.6.4.6.4 Sensibilidad a matrícula y capacidad práctica.

El efecto de la matrícula y de los umbrales de capacidad fue desarrollado específicamente en la Sección 3.6.4.4, mediante la Tabla 3-31 y la figura de sensibilidad del VAN.

Los resultados muestran que esta variable produce cambios de mayor magnitud que las variaciones analizadas en tasa de descuento, horizonte o frecuencia. Dentro del primer bloque práctico, una mayor utilización de capacidad permite distribuir costos entre más participantes y el VAN pasa a positivo aproximadamente desde 19 participantes.

Al superar los 20 participantes se produce una discontinuidad debido a la apertura de un segundo bloque práctico, provocando inicialmente una disminución del resultado financiero. Posteriormente, el VAN vuelve a ser positivo aproximadamente desde 27 participantes, a medida que el costo adicional del segundo bloque se distribuye entre una matrícula mayor.

Este comportamiento confirma que la utilización de capacidad práctica constituye una de las variables de mayor incidencia sobre el resultado económico del modelo.

3.6.4.6.5 Síntesis de las principales sensibilidades del escenario S2.

Tabla 3-35: *Síntesis de las principales sensibilidades del escenario S2.*

Condición evaluada	**VAN aproximado [CLP]**	**Lectura**
Caso base: N=16, $550.000, 3 versiones, 3 años, 10 %	**-$8.309.984**	Operación anual positiva, pero sin recuperación financiera dentro del horizonte.
Tasa 5 %, manteniendo caso base	-$7.594.098	Una menor tasa mejora el resultado, pero no cambia su signo.
Tasa 15 %, manteniendo caso base	-$8.920.293	Una mayor exigencia financiera deteriora el resultado.
Horizonte 5 años, tasa 10 %	-$5.884.446	La extensión temporal mejora el VAN, pero no alcanza equilibrio financiero.
5 versiones/año, N=16 y $550.000	-$3.471.541	Una mayor frecuencia mejora el resultado, pero sigue siendo insuficiente.
N=20, $550.000 y 3 versiones	**+$6.965.803**	La utilización elevada del primer bloque permite obtener VAN positivo.
N=21, $550.000 y 3 versiones	-$19.907.278	La apertura del segundo bloque genera un salto discreto de costos.
N=27, $550.000 y 3 versiones	**+$3.006.402**	El segundo tramo vuelve a absorber sus costos con una mayor matrícula.

Fuente: *Elaboración propia a partir del modelo técnico-económico.*

Los resultados permiten identificar que las variaciones en tasa de descuento, horizonte y frecuencia modifican la magnitud del VAN, pero no revierten por sí solas el resultado negativo del caso base. Del mismo modo, incrementar el precio dentro del rango evaluado mejora los indicadores, aunque con 16 participantes no permite recuperar la inversión dentro del horizonte considerado.

La matrícula y la utilización de capacidad presentan una incidencia más significativa, debido a que afectan simultáneamente los ingresos y la distribución de los costos fijos y semivariables. Al mismo tiempo, la existencia del umbral de 20 participantes introduce una discontinuidad que obliga a analizar la operación por tramos.

En consecuencia, la sensibilidad indica que la viabilidad económica de la propuesta depende principalmente de alcanzar una utilización suficiente de la capacidad disponible, manteniendo un precio compatible con el posicionamiento comercial y evitando asumir como condición base una frecuencia anual cuya demanda no se encuentre respaldada.

Estos resultados constituyen un antecedente para la comparación final de alternativas y para la posterior definición de una configuración preliminar de puesta en marcha, sin establecer todavía una recomendación definitiva de matrícula o precio.

3.6.4.6.6 Interpretación de robustez.

El análisis de sensibilidad muestra que, para el escenario S2 utilizado como referencia, las variaciones en parámetros estrictamente financieros modifican la magnitud del resultado, pero no alteran por sí solas la conclusión obtenida bajo la matrícula base de 16 participantes. Reducir la tasa de descuento, ampliar el horizonte o utilizar una mayor cantidad de versiones anuales mejora el VAN, aunque no resulta suficiente para hacerlo positivo bajo dicha matrícula.

En cambio, la matrícula y la utilización de la capacidad práctica presentan una incidencia mayor sobre el desempeño económico, debido a que afectan simultáneamente los ingresos y la distribución de costos asociados a docencia, infraestructura y ejecución práctica. Asimismo, el umbral de 20 participantes genera una discontinuidad al requerir un segundo bloque práctico.

Estos resultados corresponden al comportamiento del escenario S2 y no sustituyen la comparación final entre las alternativas curricularmente factibles. Sin embargo, permiten

identificar que una eventual puesta en marcha debe considerar conjuntamente matrícula, precio y utilización de capacidad, en lugar de depender únicamente de ajustes en parámetros financieros.

Dado que la investigación no incorpora una medición formal de demanda ni de disposición a pagar, las condiciones comerciales identificadas mediante el modelo deben ser validadas antes de una eventual apertura del curso.

3.6.5 Selección de alternativa y condiciones de implementación.

La selección final de la configuración formativa se realiza integrando los resultados curriculares, técnico-operacionales y económico-financieros obtenidos mediante el modelo. La decisión se estructura de manera secuencial, de modo que una alternativa no pueda ser seleccionada únicamente por presentar menores costos o mejores indicadores económicos si previamente no satisface los requerimientos académicos definidos para el curso.

En una primera etapa se aplica la condición de factibilidad curricular. Bajo este criterio, el escenario S1 de 24 horas queda excluido, debido a que no permite cubrir íntegramente las horas y actividades mínimas definidas para los ocho módulos del syllabus propuesto.

En consecuencia, el conjunto de alternativas admisibles queda conformado por:

$$S_{factible} = \{S2, S3, S4\}$$

correspondientes a 40, 60 y 80 horas, respectivamente.

Sobre este conjunto se aplica el criterio económico definido para Solver, manteniendo constantes la matrícula, el precio y la cantidad de versiones del caso base. La función de selección corresponde a:

$$max \sum_{s \in S} VAN_s^{plan} x_S$$

sujeta a:

$$\sum_{s \in S} x_s = 1$$

$$x_s \leq Q_s \ \ \forall s \ \epsilon \ S$$

$$x_s \in \{0,1\}$$

Donde Q_s representa la factibilidad curricular de cada escenario.

Bajo las condiciones del caso base, Solver identifica S2, de 40 horas, como la alternativa con mayor VAN dentro del conjunto de escenarios curricularmente factibles.

***Tabla 3-36**: Síntesis de criterios para la selección de la alternativa.*

Escenario	Duración	Factibilidad curricular	Flujo operacional anual del caso base [CLP]	VAN a 3 años del caso base [CLP]	Resultado
S1	24 h	No cumple	$10.264.709	$12.256.482	Excluido por insuficiencia curricular
S2	40 h	Cumple	**$2.062.977**	**-$8.309.984**	**Seleccionado entre escenarios factibles**
S3	60 h	Cumple	-$8.630.670	-$35.125.112	No seleccionado
S4	80 h	Cumple	-$18.842.701	-$60.732.554	No seleccionado

***Fuente:** Elaboración propia a partir del modelo técnico-económico.*

***Nota.** La selección se realiza primero por cumplimiento curricular y posteriormente por comparación económico-financiera entre las alternativas admisibles. La selección de S2 como configuración formativa no implica que su puesta en marcha resulte conveniente bajo cualquier combinación de matrícula y precio.*

3.6.5.1 Fundamentación de la selección de S2.

La selección de S2 no responde exclusivamente al resultado de Solver, sino a la convergencia de criterios curriculares, operacionales y económicos.

En primer lugar, sus 40 horas corresponden a la menor duración que permite cubrir íntegramente los requerimientos curriculares definidos para los ocho módulos. La distribución resultante corresponde a:

$$19 \ horas \ conceptuales + 21 \ horas \ prácticas = 40 \ horas$$

por lo que el componente práctico representa:

$$\frac{21}{40} = 52{,}5\%$$

Esta proporción no fue establecida previamente como una cuota obligatoria, sino que deriva de la asignación de actividades y horas realizada módulo a módulo.

En segundo lugar, S2 requiere menos recursos de ejecución que S3 y S4. Bajo el caso base de 16 participantes y tres versiones anuales presenta un flujo operacional positivo de:

$$F_{S2}^{op} = \$2.062.977$$

mientras que S3 y S4 presentan flujos operacionales negativos bajo las mismas condiciones.

Finalmente, aunque el VAN de S2 en el caso base continúa siendo negativo:

$$VAN_{S2}^{plan} = -\$8.309.984$$

su resultado es superior al obtenido por S3 y S4. El análisis de sensibilidad muestra, además, que S2 puede alcanzar resultados financieros positivos cuando aumenta la utilización de la capacidad disponible, sin modificar su estructura curricular.

Por tanto, S2 se selecciona como la configuración que mejor concilia, dentro del conjunto evaluado:

La selección corresponde al diseño formativo recomendado, mientras que la decisión de ejecutar efectivamente una versión requiere verificar las condiciones económicas y comerciales de puesta en marcha.

3.6.5.2 Condiciones económicas para la implementación.

La selección de S2 no implica recomendar su ejecución inmediata bajo cualquier condición de matrícula o precio. Para ello resulta necesario distinguir entre la selección del diseño y la decisión de puesta en marcha.

Al precio de evaluación de:

$$P = \$550.000/participante$$

el modelo identifica una matrícula de equilibrio operacional aproximada de:

$$N_{eq,op} = 15$$

Esto significa que, a partir de dicho nivel, la operación anual permite cubrir los costos recurrentes considerados. Sin embargo, alcanzar equilibrio operacional no implica recuperar la inversión inicial dentro del horizonte de tres años.

Dentro del primer bloque práctico, el VAN pasa a ser positivo aproximadamente desde:

$$N = 19\ participantes$$

al precio de $550.000 utilizado en la evaluación.

La utilización de 20 participantes presenta el mejor aprovechamiento económico de un único bloque práctico, debido a que permite distribuir una mayor proporción de los costos sin requerir todavía la repetición de las actividades prácticas. En dicha configuración:

$$P_{eq,op}(20) \approx \$413.177/participante$$

y, utilizando $550.000 por participante:

$$VAN_{20} \approx \$6.965.802$$

No obstante, $550.000 corresponde al techo comercial empleado para evaluar el modelo y no necesariamente al precio que debería recomendarse para una implementación.

Para una matrícula de 20 participantes, el precio aproximado que permite obtener:

$$VAN \approx 0$$

dentro del horizonte de tres años es:

$$P_{VAN=0,20} \approx \$503.000/participante$$

Este resultado proporciona una referencia adicional para definir una condición comercial de puesta en marcha, distinta del precio de equilibrio operacional.

3.6.5.3 Condición recomendada de lanzamiento.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda utilizar S2, de 40 horas, como configuración académica para una eventual implementación piloto del curso.

Desde la perspectiva económico-financiera, la condición más favorable dentro de un único bloque práctico corresponde a una matrícula cercana a 20 participantes, debido a que permite utilizar la capacidad existente sin repetir el componente práctico. Esta cantidad no constituye una estimación de demanda, sino una condición de implementación derivada del modelo.

Considerando conjuntamente el precio requerido para alcanzar un VAN no negativo, el techo comercial utilizado en la evaluación y las referencias de mercado analizadas se propone como precio preliminar de referencia para validación comercial un valor aproximado de:

$$\$510.000/participante$$

Con una matrícula de:

$$20\ participantes$$

Y:

$$3\ versiones/\ año$$

Bajo esta combinación, y manteniendo los restantes supuestos del modelo, se obtiene un VAN a tres años cercano a:

$$VAN \approx +\$1.000.000$$

El precio preliminar de $510.000 se sitúa por encima del valor aproximado de $503.000 necesario para alcanzar un VAN igual a cero con 20 participantes, pero permanece por debajo del techo comercial de $550.000 utilizado en la evaluación. Sin embargo, su margen de seguridad financiera es acotado y depende de alcanzar una matrícula cercana a 20 participantes bajo las condiciones del modelo. Asimismo, el valor se aproxima al tramo superior de las referencias comerciales analizadas, cuya comparabilidad debe interpretarse considerando diferencias de duración, contenidos y profundidad formativa. En consecuencia, su utilización como referencia de lanzamiento queda condicionada a una validación conjunta de matrícula y precio. Si dicha validación no permite sostener los umbrales económicos requeridos, la apertura deberá reevaluarse antes de comprometer la inversión inicial.

3.6.5.4 Configuración operativa recomendada.

Tabla 3-37: *Configuración preliminar recomendada para una eventual implementación.*

Dimensión	Configuración recomendada	Fundamento
Alternativa formativa	S2	Mayor VAN entre alternativas curricularmente factibles bajo el caso base
Duración	40 horas	Menor duración que cubre íntegramente los requerimientos curriculares
Horas conceptuales	19 h	Derivadas de la estructura modular
Horas prácticas o aplicadas	21 h	Derivadas de las necesidades formativas de los módulos
Proporción práctica	52,5 %	Resultado de la distribución curricular; no restricción predeterminada
Puestos disponibles	8	Infraestructura considerada en el modelo
Configuración práctica preferente	2 participantes por puesto	Configuración base del laboratorio
Capacidad máxima de un bloque	Hasta 20 participantes	Extensión limitada mediante un tercer integrante en los puestos necesarios
Segundo bloque práctico	Desde 21 participantes	Superación de la capacidad adoptada para una única cohorte
Grupos simultáneos	1	Reutilización secuencial del laboratorio y equipamiento
Matrícula de referencia del modelo	16 participantes	Base homogénea utilizada para comparar escenarios; no estimación de demanda
Matrícula de equilibrio operacional a $550.000	Aproximadamente 15 participantes	Resultado del modelo
Matrícula aproximada con VAN ≥ 0 a $550.000	19 participantes	Resultado del análisis discreto dentro del primer bloque
Condición recomendada para validación de lanzamiento	20 participantes	Mayor aprovechamiento de capacidad sin abrir segundo bloque
Precio preliminar para validación comercial	**≈ $510.000/participante**	Superior al umbral aproximado de VAN=0 con N=20 y menor al techo comercial de evaluación
Versiones de planificación	3 por año	Supuesto de comparación y planificación; no pronóstico de ventas
Plataforma industrial	1 RPAS de referencia	Observación integrada de sistemas sin utilizarlo permanentemente como banco de desmontaje
Equipamiento	Según simultaneidad de uso	Evita duplicación innecesaria de recursos especializados

Fuente: *Elaboración propia a partir del diseño curricular y del modelo técnico-económico.*

Cuando la matrícula supera los 20 participantes, no se recomienda abrir automáticamente una versión bajo las mismas condiciones sin evaluar previamente el efecto del segundo bloque práctico. El paso a 21 participantes obliga a repetir las 21 horas prácticas y genera un incremento discreto en los costos de ejecución. En el análisis realizado, el VAN vuelve a ser positivo aproximadamente desde 27 participantes a un precio de $550.000.

Por esta razón, para una primera implementación resulta operacionalmente más simple privilegiar una única cohorte práctica y validar previamente la combinación de matrícula y precio antes de considerar una estructura con dos grupos secuenciales.

3.6.6 Limitaciones, condiciones de validación y líneas de desarrollo futuro.

El modelo desarrollado permite comparar alternativas curriculares y estimar preliminarmente las condiciones técnicas, operacionales y económicas asociadas a una eventual implementación del curso. No obstante, sus resultados deben interpretarse dentro del alcance definido para esta investigación, debido a que determinados parámetros corresponden a antecedentes disponibles para la evaluación o a supuestos de modelación que deberán ser confirmados antes de una decisión institucional de puesta en marcha.

La principal limitación corresponde a que la investigación no incorporó un estudio formal de demanda ni una medición de disposición a pagar. En consecuencia, las matrículas utilizadas representan escenarios de evaluación y no proyecciones de inscripción. Del mismo modo, los $550.000 por participante utilizados durante el desarrollo del modelo corresponden a un techo comercial de evaluación y no a un arancel definitivo ni a una disposición a pagar medida.

A partir de los resultados del modelo se propuso posteriormente un valor preliminar cercano a $510.000 por participante, asociado a una configuración de 20 participantes y tres versiones anuales. Este valor debe interpretarse como una referencia para validación comercial y no como una decisión tarifaria definitiva de la Universidad.

Esta limitación resulta especialmente relevante debido a que el análisis de sensibilidad identifica a la matrícula, el precio y la utilización de la capacidad práctica como variables con incidencia directa sobre el resultado económico. Por ello, una eventual puesta en marcha deberá estar precedida por una validación comercial que permita contrastar el interés efectivo del público objetivo, la matrícula potencial y el rango de precio aceptable.

Una segunda limitación corresponde al carácter preliminar de determinados antecedentes institucionales utilizados para representar costos y capacidades. Los valores asociados a docencia, sala, laboratorio, comisión de Educación Continua, presupuesto de difusión y disponibilidad de infraestructura se incorporaron a partir de antecedentes proporcionados para la construcción del modelo. Estos valores permiten valorizar una eventual implementación, pero deberán confirmarse con las unidades correspondientes antes de comprometer recursos institucionales.

Asimismo, algunos parámetros fueron establecidos expresamente como supuestos de modelación ante la ausencia de información definitiva. Entre ellos se encuentran la disponibilidad anual de 44 semanas, la programación de 10 horas semanales, los períodos de preparación, cierre y holgura, las tres versiones anuales de referencia, la contingencia de 5 %, la provisión anual para mantenimiento de la plataforma RPAS, los costos variables por participante, el período de desfase utilizado para estimar capital de trabajo, la tasa de descuento y el horizonte de evaluación.

Estos supuestos permanecen editables en el modelo y no representan políticas institucionales. Su función es construir un escenario base trazable y permitir analizar cómo cambian los resultados cuando se modifican las principales condiciones de implementación.

3.6.6.1 Validación de la capacidad práctica.

La disponibilidad de ocho puestos de trabajo constituye el antecedente físico utilizado para dimensionar las actividades prácticas. La configuración preferente considera dos participantes por puesto, equivalente a:

$$8 * 2 = 16\ participantes$$

Para matrículas superiores a 16 y hasta 20 participantes se propone incorporar un tercer integrante únicamente en los puestos necesarios. Para una cohorte de 20 participantes:

$$(4 * 3) + (4 * 2) = 20$$

Esta configuración corresponde a una extensión operacional acotada y no a un estándar pedagógico universal. Su propósito es utilizar la infraestructura disponible sin modificar la actividad desarrollada por cada estación ni requerir inmediatamente un segundo bloque práctico.

Antes de implementar comercialmente una configuración de hasta 20 participantes deberá verificarse que la incorporación de un tercer integrante en determinados puestos no limite la participación efectiva en actividades de manipulación, medición, diagnóstico o documentación ni comprometa los resultados de aprendizaje definidos.

Esta validación puede efectuarse mediante revisión académica de las actividades prácticas y posteriormente mediante seguimiento de la primera ejecución del curso. Entre los aspectos a observar se encuentran el tiempo efectivo de participación por estudiante, disponibilidad de herramientas, cumplimiento de actividades y logro de los resultados de aprendizaje.

Si se determinara que las actividades requieren estrictamente dos participantes por puesto, la capacidad de un único bloque deberá modificarse de:

$$20 \rightarrow 16$$

y el modelo técnico-económico deberá recalcular automáticamente los costos, puntos de equilibrio y condiciones de apertura de grupos secuenciales.

3.6.6.2 Validación curricular.

Las 40 horas correspondientes al escenario S2 constituyen la menor duración identificada en esta investigación que permite cubrir íntegramente los requerimientos definidos para los ocho módulos propuestos:

$$19\ horas\ conceptuales + 21\ horas\ prácticas = 40\ horas$$

Esta carga horaria corresponde a una decisión de diseño curricular derivada del análisis de brechas, los resultados de aprendizaje y las actividades previstas para cada módulo. No

representa una duración establecida normativamente por la autoridad aeronáutica ni un estándar institucional previamente definido por la Universidad.

Por esta razón, la suficiencia efectiva de la duración deberá ser revisada académicamente antes de la implementación y posteriormente contrastada mediante la primera ejecución del curso. Esta validación deberá determinar si el tiempo asignado permite alcanzar adecuadamente los resultados de aprendizaje, especialmente en los módulos que incorporan diagnóstico, procedimientos de fabricante, documentación, mantenimiento aplicado y taller integrador.

La evaluación posterior podrá considerar indicadores como cumplimiento de las actividades programadas, resultados de evaluación, utilización efectiva de las horas prácticas y retroalimentación de participantes y docentes. Las 40 horas se interpretan, por tanto, como una configuración curricular inicial recomendada y susceptible de perfeccionamiento, siempre que cualquier modificación preserve las competencias y contenidos mínimos identificados durante la investigación.

3.6.6.3 Validación del equipamiento y costos de inversión.

La inversión técnica fue estimada mediante precios y cotizaciones disponibles durante el desarrollo de la investigación. Estos antecedentes permiten dimensionar económicamente la puesta en marcha, pero pueden variar como consecuencia de cambios de mercado, disponibilidad de productos, tipo de cambio y evolución tecnológica.

Por ello, antes de realizar adquisiciones deberán actualizarse las cotizaciones y verificarse la compatibilidad entre la plataforma RPAS, componentes didácticos, herramientas, instrumental y actividades prácticas previstas.

El dimensionamiento del equipamiento tampoco supone que todos los recursos deban adquirirse en cantidades iguales. La configuración propuesta diferencia entre elementos

necesarios simultáneamente en cada puesto y recursos especializados que pueden compartirse sin afectar el desarrollo de las actividades.

Si durante el diseño detallado de las prácticas se determinara que un instrumento actualmente considerado compartido debe utilizarse simultáneamente en un mayor número de estaciones, su cantidad deberá modificarse y el efecto correspondiente incorporarse en la inversión inicial del modelo.

Del mismo modo, aquellos recursos considerados disponibles institucionalmente deberán verificarse antes de la puesta en marcha. Si alguno no estuviera disponible o no cumpliera las condiciones requeridas, deberá incorporarse su costo incremental al escenario correspondiente.

3.6.6.4 Validación comercial, financiero e institucional.

La selección del escenario S2 corresponde a una decisión de diseño derivada del cumplimiento curricular y de la comparación técnico-económica realizada. Sin embargo, su selección no implica por sí misma autorizar la ejecución del curso.

El modelo identifica una matrícula aproximada de 15 participantes como umbral de equilibrio operacional al precio de evaluación de $550.000. Asimismo, dentro del primer bloque práctico, el VAN pasa a ser positivo aproximadamente desde 19 participantes bajo dicho precio.

Para una configuración de 20 participantes, el precio operacional de equilibrio disminuye aproximadamente a:

$$P_{eq,op}(20) \approx \$413.177/participante$$

mientras que el precio requerido para obtener un VAN cercano a cero dentro del horizonte de tres años se sitúa aproximadamente en:

$$P_{VAN=0,20} \approx \$503.000/participante$$

Sobre esta base, se propuso aproximadamente $510.000 por participante como referencia preliminar para una validación comercial de la configuración de 20 participantes.

Antes de una eventual apertura, deberá verificarse que exista una combinación plausible de matrícula y precio compatible con estos umbrales. Esta validación puede considerar mecanismos institucionales de sondeo de interés, antecedentes de postulaciones, consultas a potenciales participantes, comparación actualizada con programas afines y evaluación comercial realizada por la unidad responsable de Educación Continua.

Asimismo, deberán confirmarse los costos institucionales utilizados en el modelo, la disponibilidad real de infraestructura, las condiciones administrativas de operación y el tratamiento aplicable a la apertura y cierre de cada versión.

La evaluación económica desarrollada corresponde a flujos preliminares de proyecto y no incorpora efectos tributarios institucionales específicos. Este aspecto deberá ser revisado por las unidades competentes si se avanza hacia una implementación efectiva, sin que ello modifique el propósito comparativo y de apoyo a la decisión del modelo desarrollado en esta investigación.

3.6.6.5 Líneas de desarrollo futuro.

Una primera línea de desarrollo corresponde a validar la propuesta mediante una ejecución piloto o primera versión controlada, permitiendo contrastar la duración de los módulos, funcionamiento de los puestos prácticos, utilización efectiva de equipamiento y logro de los resultados de aprendizaje.

Una segunda línea consiste en incorporar al modelo antecedentes reales de matrícula, costos y comportamiento de los participantes una vez que exista experiencia de implementación. Esto permitiría reemplazar progresivamente los supuestos utilizados en esta evaluación por información observada y mejorar la precisión de futuras decisiones.

Asimismo, podría profundizarse el análisis comercial mediante un estudio específico de demanda y disposición a pagar, segmentado según perfiles potenciales como técnicos aeronáuticos, profesionales de áreas eléctricas o electrónicas, operadores RPAS y personal de organizaciones que utilicen drones en actividades profesionales.

Finalmente, una vez acumulada experiencia académica y evidencia de mercado, podría evaluarse la evolución del curso hacia otras modalidades de mayor profundidad o articulación formativa. Esta posibilidad no constituye una recomendación inmediata de crear un diplomado, modificar la carrera TUMA o desarrollar una nueva carrera, sino una línea de desarrollo condicionada a los resultados de implementación, demanda, recursos disponibles y necesidades futuras del sector.

3.6.6.6 Incertidumbre de costos variables y recurrentes.

El costo variable utilizado en el modelo corresponde a:

$$C_{var} = \$30.000/participante$$

y se compone de una provisión de $15.000 para consumibles técnicos, $10.000 para reposición menor de componentes didácticos y $5.000 para material individual.

Esta desagregación permite identificar la naturaleza de los consumos considerados, pero no corresponde a un costo histórico observado, debido a que el curso aún no ha sido implementado. Por esta razón, los tres componentes permanecen como parámetros editables y deberán ser reemplazados por información efectiva de consumo en caso de ejecutarse una primera versión.

De manera similar, la provisión anual destinada al mantenimiento de la plataforma RPAS corresponde al 5 % de su valor de adquisición. Este porcentaje constituye un supuesto preventivo del modelo y no una tarifa de mantenimiento establecida por el fabricante.

Por lo tanto, tanto los costos variables como la provisión de mantenimiento deberán contrastarse posteriormente con antecedentes reales de compra, utilización y mantenimiento.

Esta actualización permitirá mejorar progresivamente la precisión del modelo sin modificar su estructura general.

3.6.6.7 Supuestos financieros.

La tasa de descuento de:

$$i = 10\%$$

y el horizonte de:

$$T = 3\ años$$

corresponden a supuestos utilizados para construir el escenario base y no a parámetros financieros institucionales definidos por la Universidad Técnica Federico Santa María.

Su efecto fue evaluado mediante análisis de sensibilidad. Los resultados muestran que modificar la tasa de descuento o extender el horizonte altera la magnitud del VAN, pero no constituye la principal fuente de variación bajo la matrícula base utilizada. La utilización de flujos descontados, Valor Actual Neto y análisis de sensibilidad responde a criterios habituales de evaluación económica de proyectos (Sapag Chain & Sapag Chain, 2008).

Asimismo, el modelo incorpora un mes de costos operacionales como capital de trabajo mediante el método del período de desfase. Este período representa una estimación de liquidez inicial y no una política de pago o cobranza de Educación Continua.

Finalmente, no se asigna valor residual al equipamiento al término del horizonte de tres años, debido a que no se dispone de antecedentes suficientemente robustos para estimar su valor de realización. Esta decisión evita mejorar el resultado financiero mediante un beneficio terminal no respaldado y constituye un tratamiento conservador para efectos de la evaluación.

3.6.6.8 Proyección hacia una eventual aprobación o reconocimiento DGAC.

Como línea de desarrollo posterior, se considera pertinente analizar formalmente con la Dirección General de Aeronáutica Civil la existencia de una eventual vía de aprobación o reconocimiento aplicable a una formación especializada en mantenimiento de RPAS/drones.

La DAN 147, *Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento*, establece el marco de certificación para organizaciones que imparten instrucción y entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento. La norma contempla requisitos relativos a organización, personal, programas de instrucción, infraestructura, equipamiento, registros, aseguramiento de la calidad y documentación institucional. Asimismo, contempla la preparación de cursos especiales previamente aprobados por la DGAC (DGAC, 2023a).

No obstante, la propia DAN 147 se encuentra orientada a centros que forman o entrenan personal aeronáutico regulado por el régimen de licencias y por la DAN 145. En consecuencia, la aplicabilidad de esta vía a un curso especializado en mantenimiento de RPAS/drones no se considera demostrada en esta investigación y deberá ser consultada formalmente con la autoridad aeronáutica antes de iniciar cualquier proceso de certificación o aprobación.

Existe, además, un antecedente institucional relevante. El listado oficial de centros de instrucción y entrenamiento publicado por la DGAC identifica a la Universidad Técnica Federico Santa María como CIAC Tipo I, en el ámbito correspondiente a centros de instrucción aeronáutica. Sin embargo, este antecedente no equivale a que la Universidad disponga actualmente de una certificación bajo DAN 147 para impartir formación de personal aeronáutico de mantenimiento ni habilita automáticamente el curso propuesto (DGAC, 2026b).

Esta eventual vía tampoco debe confundirse con el Certificado de Operador Aéreo asociado a empresas RPAS que imparten instrucción de vuelo. La DAN 119 establece que un

solicitante de AOC destinado a impartir instrucción de vuelo RPAS debe incorporar al Manual de Operaciones los respectivos programas teóricos y prácticos. Dicha disposición se refiere a instrucción operacional de vuelo y no constituye, por sí misma, un mecanismo de aprobación de un curso académico de mantenimiento como el desarrollado en esta memoria (DGAC, 2025b).

Por lo tanto, la presente investigación no propone solicitar inmediatamente una certificación DAN 147 ni atribuye al curso reconocimiento formal por parte de la DGAC. Se identifica únicamente una línea de análisis institucional futura, condicionada a que la autoridad confirme previamente la pertinencia y aplicabilidad de dicha vía al ámbito RPAS.

3.6.6.9 Brechas respecto de una eventual vía bajo DAN 147.

Aunque la aplicabilidad de la DAN 147 al curso propuesto no ha sido confirmada, resulta posible efectuar una comparación preliminar entre los antecedentes desarrollados en esta memoria y algunos de los requisitos contemplados por dicha norma.

La propuesta dispone actualmente de una estructura modular, resultados de aprendizaje, distribución de carga horaria, contenidos teóricos y prácticos, mecanismos preliminares de evaluación, definición de infraestructura y equipamiento y criterios generales respecto de recursos docentes. Estos elementos presentan correspondencia parcial con antecedentes que la DAN 147 exige para la aprobación de programas de instrucción, tales como malla curricular, objetivos específicos, distribución horaria, material de enseñanza, bibliografía, instalaciones y personal competente (DGAC, 2023a).

Sin embargo, esta correspondencia no implica cumplimiento normativo ni constituye una certificación. La DAN 147 contempla adicionalmente requisitos organizacionales y documentales que exceden el alcance de esta memoria, entre ellos estructura formal del centro, antecedentes y calificaciones del personal, Especificaciones de Instrucción o Entrenamiento (ESINS/ESEN), sistemas de registros, garantía de calidad, lista de

cumplimiento y Manual de Instrucción y Procedimientos (MIP), además de la disponibilidad de instalaciones y equipos sujetos a evaluación por parte de la autoridad (DGAC, 2023a).

El proceso de certificación definido en la norma contempla cinco etapas: reunión informativa, solicitud formal, evaluación de documentación, demostración e inspección, y aprobación y otorgamiento del certificado correspondiente. Ninguna de estas etapas se considera iniciada o cumplida como consecuencia del desarrollo de la presente memoria (DGAC, 2023a).

Tabla 3-38: *Brecha preliminar respecto de una eventual aprobación DGAC bajo DAN 147.*

Requisito o dimensión	Estado en la propuesta	Acción pendiente
Definición de módulos y contenidos	Desarrollado	Someter contenidos a revisión académica y, si corresponde, a los criterios definidos por la DGAC.
Objetivos y resultados de aprendizaje	Desarrollado	Adecuar su formulación si la autoridad establece requerimientos específicos.
Distribución de carga horaria	Desarrollado	Validar suficiencia académica y eventual correspondencia con exigencias aplicables.
Componente teórico-práctico	Desarrollado	Validar formalmente las actividades, procedimientos y condiciones de ejecución.
Evaluaciones	Desarrollado preliminarmente	Formalizar instrumentos, criterios de aprobación y registros de evaluación.
Bibliografía y documentación técnica	Desarrollado preliminarmente	Consolidar el material técnico definitivo y control de versiones.
Equipamiento e infraestructura	Dimensionado preliminarmente	Confirmar disponibilidad, adquirir recursos faltantes y someterlos a revisión si corresponde.
Aplicabilidad de DAN 147 al mantenimiento RPAS	**No confirmada**	**Realizar consulta formal a la DGAC antes de iniciar cualquier proceso.**
Curso especial bajo DAN 147	No tramitado	Evaluar esta posibilidad únicamente si la DGAC confirma su aplicabilidad.
ESINS/ESEN	No desarrolladas	Preparar documentación solo en caso de avanzar por una vía formal bajo DAN 147.
Manual de Instrucción y Procedimientos (MIP)	No desarrollado	Elaborar conforme a los requisitos aplicables si se inicia un proceso de certificación.
Sistema de garantía de calidad	No desarrollado para esta propuesta	Definir procedimientos, responsabilidades, control documental y mejora continua.
Sistema formal de registros	Parcial	Definir registros de participantes, evaluaciones, instructores y control documental.
Personal instructor bajo DAN 147	No validado	Verificar experiencia, competencias, licencias y demás requisitos aplicables.
Estructura CIAC/CEAC bajo DAN 147	No desarrollada para esta propuesta	Determinar con la DGAC si corresponde una certificación organizacional o una vía distinta.
Proceso formal de certificación	No iniciado	Iniciar las etapas establecidas únicamente si la autoridad confirma la aplicabilidad de la norma.

Fuente*: Elaboración propia a partir de la DAN 147 (DGAC, 2023a) y de la propuesta curricular desarrollada en esta investigación.*

3.6.6.10 Implicancia de DAN 147 sobre la dotación docente.

En caso de que la Dirección General de Aeronáutica Civil confirmara que una eventual vía de aprobación del curso debe ajustarse a la DAN 147, sería necesario revisar también la dotación docente considerada en el modelo técnico-económico.

La DAN 147 establece que, para entrenamiento práctico desarrollado bajo un programa de instrucción aprobado, debe considerarse un instructor por un máximo de quince estudiantes. La norma establece además requisitos de competencia y calificación del personal encargado de impartir y supervisar la instrucción (DGAC, 2023a).

La configuración utilizada en el modelo considera un docente principal y un apoyo técnico o ayudante durante las actividades prácticas. Por lo tanto, para una cohorte comprendida entre 16 y 20 participantes, una eventual aplicación de la relación establecida por DAN 147 requeriría verificar si el apoyo técnico reúne las condiciones necesarias para desempeñarse formalmente como instructor o, en caso contrario, incorporar un segundo instructor calificado.

Esta condición podría modificar el costo de ejecución del curso y, por consiguiente, los puntos de equilibrio y resultados financieros estimados. No se incorpora al caso base debido a que la propuesta corresponde actualmente a un curso de educación continua y la aplicabilidad de DAN 147 al mantenimiento especializado de RPAS/drones no ha sido confirmada por la autoridad aeronáutica.

En consecuencia, la dotación docente considerada en el modelo resulta válida para la evaluación preliminar desarrollada en esta memoria, pero deberá recalcularse si una futura consulta a la DGAC determina requisitos adicionales de certificación, supervisión o calificación de instructores.

3.6.6.11 Línea futura de articulación en diseño e integración de RPAS.

Como línea de desarrollo posterior podría evaluarse la articulación de la formación en mantenimiento con actividades académicas orientadas al diseño e integración de sistemas RPAS. Esta materia no forma parte del curso de 40 horas seleccionado ni de la evaluación técnico-económica desarrollada, dado que incorporaría competencias, recursos y resultados de aprendizaje diferentes de los considerados en la presente propuesta.

La Universidad Técnica Federico Santa María dispone de antecedentes que muestran capacidades institucionales relacionadas con este ámbito. En 2026, el Departamento de Electrotecnia e Informática de la Sede Viña del Mar recibió una plataforma hexacóptero destinada a actividades de aprendizaje avanzado, integración de sistemas, electrónica, sensores, control, robótica y sistemas autónomos (Universidad Técnica Federico Santa María, 2026). La propia publicación institucional confirma que se trata de un *frame* equipado con motores, ESC y hélices, destinado a actividades académicas y de investigación.

A nivel nacional, la iniciativa *Flying Challenge* de la Universidad de Chile constituye otro antecedente de aprendizaje aplicado, en el cual estudiantes diseñan, fabrican y prueban en vuelo aeronaves no tripuladas de propulsión eléctrica, integrando actividades de diseño, construcción y validación (Universidad de Chile, 2024).

Estos antecedentes permiten identificar una posible línea de desarrollo futuro, pero no justifican ampliar el alcance del curso propuesto en esta memoria. Una eventual formación en diseño, integración o construcción de RPAS debería formularse como una iniciativa independiente, con sus propios resultados de aprendizaje, recursos, evaluación técnica y análisis regulatorio.

En caso de contemplarse actividades de vuelo con prototipos, su ejecución deberá evaluarse separadamente conforme a la normativa y autorizaciones aeronáuticas aplicables. La construcción o integración con fines académicos no implica por sí misma autorización para operar el sistema en el espacio aéreo.

3.6.6.12 Actualización normativa.

La propuesta curricular y el modelo de implementación fueron construidos a partir de la normativa, antecedentes técnicos, documentación de fabricante y condiciones disponibles durante el desarrollo de la investigación. Debido a la evolución normativa y tecnológica propia del sector RPAS/drones, estos antecedentes deberán verificarse antes de una eventual implementación y actualizarse posteriormente de manera periódica.

En particular, deberá revisarse la vigencia de las normas DGAC utilizadas, las condiciones aplicables a la operación y mantenimiento de RPAS, las instrucciones de fabricante y la disponibilidad de plataformas, software, firmware, baterías, sensores y herramientas utilizadas como recursos formativos.

Esta actualización deberá incorporarse mediante revisión documental, control de versiones del material de enseñanza y ajustes de contenidos cuando se produzcan modificaciones relevantes. De esta manera, la propuesta puede mantener su pertinencia sin requerir rediseñar completamente el programa ante cada cambio tecnológico o regulatorio.

El curso mantiene en todo momento un propósito formativo y no otorga por sí mismo licencias, habilitaciones, atribuciones de certificación, autorización de retorno al servicio ni facultades regulatorias de mantenimiento u operación de RPAS. Las actividades deberán mantenerse dentro del alcance académico definido y respetar la normativa vigente y las limitaciones establecidas por fabricantes y autoridades competentes.

Tabla 3-39: *Principales limitaciones y acciones de validación de la propuesta.*

Dimensión	Limitación o incertidumbre	Efecto potencial	Acción de validación o mitigación
Demanda	No se realizó una estimación formal de demanda.	La matrícula de los escenarios no representa inscripción esperada.	Realizar validación comercial y sondeo de interés previo al lanzamiento.
Precio	No se midió disposición a pagar.	El precio preliminar de referencia no garantiza aceptación comercial.	Validar rango de precio con público objetivo y antecedentes actualizados de mercado.
Costos institucionales	Algunos valores corresponden a antecedentes preliminares entregados para la evaluación.	Los costos reales pueden diferir de los utilizados en el modelo.	Confirmar docencia, sala, laboratorio, comisión, difusión y demás costos con las unidades responsables.
Capacidad práctica	La extensión desde 16 hasta 20 participantes mediante un tercer integrante en determinados puestos no ha sido probada en una ejecución real.	Puede afectar la participación efectiva o los resultados de aprendizaje.	Validar mediante revisión académica y primera ejecución del curso.
Diseño curricular	Las 40 horas corresponden a una propuesta derivada del análisis y no a un estándar normativo.	La distribución horaria puede requerir ajustes.	Evaluar logro de resultados de aprendizaje y utilización real de horas en una primera versión.
Equipamiento e inversión	Precios, disponibilidad y compatibilidad pueden variar.	Puede modificarse la inversión inicial requerida.	Actualizar cotizaciones y verificar compatibilidad antes de adquirir recursos.
Costos variables y mantenimiento	No existe historial real de consumos; la reserva de mantenimiento de 5 % es un supuesto.	Puede variar el costo efectivo de operación.	Sustituir progresivamente los supuestos por datos observados de consumo y mantenimiento.
Calendario y frecuencia anual	Las semanas disponibles y tres versiones anuales corresponden a parámetros de planificación.	La capacidad real anual puede diferir del escenario evaluado.	Validar programación académica e institucional antes del lanzamiento.
Capital de trabajo	Se utiliza un mes de desfase como supuesto de liquidez.	La necesidad inicial de caja puede diferir.	Confirmar ciclo institucional de cobros y pagos y recalcular el parámetro.
Evaluación financiera	Tasa de descuento y horizonte corresponden a supuestos de evaluación.	Modifican la magnitud del VAN.	Mantener análisis de sensibilidad y actualizar los parámetros si existen criterios institucionales.
Tratamiento tributario	No se incorporan efectos tributarios institucionales específicos.	Puede modificar los flujos efectivos de una implementación.	Validar su tratamiento con las unidades financieras competentes antes de la puesta en marcha.
Posible vía DGAC/DAN 147	Su aplicabilidad al curso de mantenimiento RPAS no se encuentra confirmada.	No puede presentarse actualmente como curso aprobado o certificado por la DGAC.	Realizar consulta formal a la autoridad antes de iniciar cualquier proceso de aprobación.
Dotación docente bajo DAN 147	El modelo considera un docente y un apoyo técnico.	Si DAN 147 resultara aplicable, podría requerirse un segundo instructor calificado para cohortes superiores a 15 participantes.	Verificar requisitos del personal y recalcular costos si corresponde.
Actualización normativa y tecnológica	Normas, plataformas, software y procedimientos pueden cambiar.	Los contenidos podrían perder vigencia.	Establecer revisión periódica, control documental y actualización de contenidos antes de cada versión cuando corresponda.

Fuente*: Elaboración propia a partir de las limitaciones y acciones de validación descritas en la sección 3.6.6.*

3.6.6.13 Cierre de la evaluación de puesta en marcha.

Considerando las restricciones, supuestos y condiciones de validación identificadas, el modelo técnico-económico se interpreta como una herramienta preliminar de apoyo a la decisión y no como una proyección definitiva de resultados comerciales. Su principal aporte consiste en traducir la propuesta curricular en requerimientos cuantificables de capacidad, infraestructura, recursos humanos, equipamiento, inversión y costos de operación, permitiendo determinar las condiciones bajo las cuales una eventual implementación puede resultar académicamente suficiente, operacionalmente ejecutable y económicamente sostenible.

La aplicación secuencial de los criterios curriculares y económico-financieros permitió seleccionar el escenario S2 de 40 horas como la configuración de mejor desempeño relativo entre las alternativas que cumplen los requerimientos formativos definidos. Esta selección corresponde al diseño recomendado del curso y no implica su apertura automática, debido a que la puesta en marcha permanece condicionada a la validación institucional de los recursos y costos considerados y a la comprobación comercial de una combinación viable de matrícula y precio.

El análisis permitió además identificar condiciones concretas para orientar dicha validación. La configuración de 20 participantes permite utilizar de manera intensiva un único bloque práctico sin requerir la repetición de las actividades aplicadas, mientras que un precio cercano a $510.000 por participante constituye una referencia preliminar para validación comercial bajo los supuestos utilizados. Estos valores no representan una estimación de demanda ni un arancel institucional definitivo.

Finalmente, se identifican líneas de desarrollo posteriores que no forman parte de la puesta en marcha evaluada. Entre ellas se encuentran la consulta formal a la DGAC respecto de una eventual vía de aprobación o reconocimiento de la formación y la posibilidad de desarrollar, de manera independiente, otras iniciativas académicas relacionadas con diseño e integración

de RPAS. Ambas requieren evaluaciones específicas y no modifican el alcance ni los resultados de la propuesta desarrollada en esta investigación.

De esta manera, la evaluación de puesta en marcha entrega una configuración académica seleccionada, identifica sus principales requerimientos y establece condiciones verificables que deberán cumplirse antes de una eventual decisión institucional de implementación.

CAPÍTULO 4
CONCLUSIONES

4 Conclusiones y recomendaciones.

4.1 Conclusiones.

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar, con base en antecedentes disponibles hasta el año 2026, los requerimientos técnicos, normativos y formativos asociados al mantenimiento profesional de RPAS/drones en Chile, considerando las necesidades del sector, el marco regulatorio nacional, referentes internacionales y las capacidades formativas existentes en la Universidad Técnica Federico Santa María, con el propósito de desarrollar una alternativa formativa pertinente y evaluar preliminarmente las condiciones técnicas, operacionales y económico-financieras asociadas a su eventual implementación.

Los resultados permiten concluir que existe fundamento técnico y académico para incorporar formación especializada en mantenimiento de RPAS/drones dentro de la oferta complementaria de la Universidad. Esta conclusión no se deriva de una estimación cuantitativa de demanda, la cual no fue realizada, sino de la convergencia entre la formalización observada en el uso profesional de RPAS, la complejidad técnica de estos sistemas, las prácticas de mantenimiento y trazabilidad identificadas mediante el levantamiento exploratorio y la existencia de capacidades formativas compatibles dentro de la USM.

La investigación permitió avanzar secuencialmente desde la identificación de antecedentes normativos, técnicos, sectoriales y formativos hacia el análisis de brechas, el desarrollo de una alternativa académica y la propuesta de condiciones preliminares para su puesta en marcha. Esta estructura permitió mantener trazabilidad entre el problema identificado, la respuesta formativa desarrollada y su posterior evaluación técnico-económica.

4.1.1 Cumplimiento del objetivo específico 1.

El primer objetivo específico permitió construir la base diagnóstica de la investigación mediante la identificación de antecedentes normativos, técnicos, sectoriales y formativos relevantes para el mantenimiento profesional de RPAS/drones en Chile.

Desde la perspectiva normativa, se determinó que la regulación chilena vinculada a RPAS/drones presenta un desarrollo explícito en materias relacionadas con operación, registro, autorización, certificación de operadores y trabajos aéreos. Normas como la DAN 151, DAN 91, DAN 119 y DAN 137 permiten integrar el uso profesional de estos sistemas dentro de estructuras formales de la actividad aeronáutica. En contraste, dentro del conjunto normativo específico de RPAS revisado no se identificó una estructura integral de mantenimiento técnico comparable con aquella existente para la aviación tradicional. Las DAN 43, DAN 145 y DAN 147 aportan criterios pertinentes sobre condición técnica, documentación, organización del mantenimiento, trazabilidad y formación de personal, pero se utilizan en esta investigación como referencias comparativas y no como disposiciones automáticamente aplicables al mantenimiento de RPAS/drones.

La revisión de referentes internacionales complementó este diagnóstico. Los antecedentes de ICAO, EASA, AESA y FAA muestran que la condición técnica de UAS/RPAS se relaciona directamente con la operación segura y que, dependiendo del marco regulatorio y del nivel de riesgo, adquieren relevancia las instrucciones de mantenimiento, las competencias del personal, los registros técnicos, la asignación de responsabilidades y la trazabilidad de las intervenciones. Estos antecedentes fueron utilizados como criterios comparativos y no como requisitos directamente transferibles al contexto chileno.

El levantamiento exploratorio permitió además identificar actores vinculados con regulación, utilización institucional, operación profesional, mantenimiento, soporte técnico y capacitación de RPAS/drones en Chile. Las respuestas obtenidas desde organismos públicos evidenciaron aplicaciones en fiscalización, inspección de infraestructura, monitoreo ambiental y territorial, seguridad, comunicaciones, emergencias y apoyo operativo, junto con diferentes modalidades de mantenimiento. Algunos organismos recurren a servicios técnicos externos, mientras que otros desarrollan revisiones básicas mediante sus propios operadores.

Asimismo, se identificó una oferta privada vinculada a diagnóstico, reparación, calibración, actualización, soporte técnico y capacitación en mantenimiento de drones. Estos antecedentes permiten confirmar la existencia de actividad técnica y formativa asociada al mantenimiento

de RPAS, aunque no permiten estimar cuantitativamente el tamaño del mercado, la matrícula potencial ni la disposición a pagar por la propuesta desarrollada.

Finalmente, la caracterización técnica permitió establecer que el mantenimiento de RPAS/drones constituye un ámbito multidisciplinario. Estos sistemas integran estructura, propulsión eléctrica, baterías, sistemas eléctricos y electrónicos, controladoras de vuelo, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware, telemetría y cargas útiles, además de documentación y procedimientos específicos de fabricante. Por ello, su mantenimiento no puede abordarse exclusivamente desde una perspectiva mecánica o de reemplazo de componentes, sino como la gestión técnica de un sistema integrado cuya condición puede incidir directamente en la seguridad operacional.

De esta forma, el primer objetivo permitió establecer una base diagnóstica sustentada en normativa, referentes internacionales, evidencia sectorial y caracterización técnica, que posteriormente fue utilizada para analizar las brechas existentes.

4.1.2 Cumplimiento del objetivo específico 2.

El segundo objetivo específico permitió transformar los antecedentes identificados en un diagnóstico de brechas, mediante el contraste entre los requerimientos asociados al mantenimiento de RPAS/drones, las prácticas observadas en el sector y las capacidades formativas existentes en la Universidad Técnica Federico Santa María.

La comparación con la formación del Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico permitió determinar que existe una base curricular compatible con diversas competencias requeridas para el mantenimiento de RPAS/drones. TUMA incorpora conocimientos relacionados con mantenimiento aeronáutico, sistemas eléctricos y electrónicos, sistemas digitales, microprocesadores, aviónica, estructuras, gestión del mantenimiento y seguridad operacional. Estas capacidades permiten abordar parte de los requerimientos identificados sin construir una futura especialización desde una base completamente nueva.

No obstante, el análisis evidenció necesidades de adaptación y profundización relacionadas específicamente con sistemas no tripulados, incluyendo arquitectura RPAS, propulsión eléctrica, baterías inteligentes, controladoras de vuelo, sensores de navegación, enlaces inalámbricos, telemetría, software, firmware, procedimientos de fabricante y trazabilidad documental específica. TUMA constituye, por tanto, una referencia curricular institucional pertinente, pero no el único perfil posible de ingreso ni una formación que cubra por sí sola todas las particularidades del mantenimiento RPAS.

A partir de esta comparación se identificaron cuatro brechas principales. La brecha normativa se relaciona con la diferencia observada entre el grado de formalización alcanzado por la operación profesional de RPAS y la menor especificidad existente respecto de su mantenimiento técnico. La brecha técnica se vincula con la necesidad de abordar sistemas, componentes y procedimientos particulares de estas plataformas. La brecha documental se manifiesta en la heterogeneidad observada en bitácoras, historiales de fallas, registros de mantenimiento, control de baterías, actualizaciones y trazabilidad de las intervenciones. Finalmente, la brecha formativa deriva de la existencia de capacidades técnicas compatibles, pero sin una integración específica de las competencias requeridas para mantenimiento de RPAS/drones.

El análisis de causa raíz permitió relacionar estas brechas con factores regulatorios, tecnológicos, documentales y formativos, evitando interpretar el problema únicamente como ausencia de cursos disponibles. Posteriormente, la priorización permitió concentrar la respuesta formativa en aquellos aspectos con mayor relación con la complejidad técnica, la trazabilidad, la seguridad operacional y la posibilidad de ser abordados mediante una intervención académica.

En consecuencia, el problema identificado no corresponde a una inexistencia absoluta de mantenimiento, capacitación o responsabilidades técnicas, sino a diferencias en el grado de especialización, sistematicidad, formalización y trazabilidad observado. Este diagnóstico proporcionó los criterios utilizados posteriormente para evaluar alternativas de incorporación formativa.

4.1.3 Cumplimiento del objetivo específico 3.

El tercer objetivo específico permitió desarrollar una respuesta académica concreta a las brechas identificadas, evaluando distintas modalidades de incorporación formativa y estructurando posteriormente la alternativa seleccionada.

Se analizaron alternativas correspondientes a la creación de una nueva carrera, modificación directa de la formación existente de TUMA, desarrollo de un diplomado, cursos breves de carácter privado y un curso de educación continua con enfoque de especialización técnica. La comparación permitió descartar, dentro del alcance de esta memoria, aquellas opciones que requerían modificaciones curriculares o institucionales de mayor magnitud y aquellas cuya profundidad resultaba insuficiente frente a las brechas identificadas.

Como resultado, se seleccionó un curso de educación continua con enfoque de especialización técnica, debido a que permite complementar capacidades académicas existentes, mantener flexibilidad de implementación y abordar de manera sistemática los requerimientos técnicos, normativos, documentales y de seguridad operacional identificados durante la investigación.

La alternativa se denomina preliminarmente “Mantenimiento técnico de RPAS/drones: sistemas, diagnóstico, documentación y seguridad operacional” y se estructura en ocho módulos que integran normativa, arquitectura RPAS, sistemas eléctricos y de propulsión, sensores, navegación y comunicaciones, software y firmware, procedimientos de fabricante, documentación y trazabilidad, diagnóstico, mantenimiento y un taller integrador.

El diseño curricular estableció una carga mínima de referencia de 40 horas, distribuidas en 19 horas conceptuales y 21 horas prácticas o aplicadas, equivalentes estas últimas al 52,5 % de la duración total. Esta proporción no fue establecida previamente como una cuota obligatoria, sino que deriva de las necesidades de aprendizaje, actividades y resultados esperados definidos para cada módulo.

La propuesta mantiene un enfoque transversal y no se encuentra asociada exclusivamente a una marca o modelo. La plataforma RPAS industrial se utiliza como sistema profesional de referencia, mientras que las actividades de manipulación, diagnóstico y mantenimiento se complementan mediante componentes didácticos, herramientas, instrumental y documentación técnica.

Asimismo, el perfil de egreso se encuentra expresamente separado de una habilitación aeronáutica formal. El curso busca desarrollar competencias complementarias para inspección, diagnóstico inicial, mantenimiento dentro de un alcance técnico definido, documentación, trazabilidad e identificación de criterios de intervención o derivación, sin otorgar por sí mismo licencias, certificaciones o autorizaciones regulatorias.
De esta manera, el tercer objetivo permitió transformar las brechas identificadas en una alternativa curricular concreta, estructurada y trazable respecto de las necesidades observadas durante la investigación.

4.1.4 Cumplimiento del objetivo específico 4.

El cuarto objetivo específico permitió traducir la propuesta académica en condiciones cuantificables de puesta en marcha mediante un modelo técnico-económico parametrizado que relaciona cobertura curricular, capacidad práctica, recursos humanos, infraestructura, equipamiento, inversión, costos, matrícula y resultados económico-financieros.

Se evaluaron cuatro escenarios de duración correspondientes a 24, 40, 60 y 80 horas. El escenario S1, de 24 horas, presentó inicialmente resultados económicos favorables, pero fue descartado debido a que no satisface los requerimientos curriculares mínimos establecidos. En consecuencia, la comparación definitiva se realizó entre S2, S3 y S4, correspondientes a 40, 60 y 80 horas.

Bajo condiciones homogéneas de matrícula, precio y frecuencia anual, S2 presenta el mejor desempeño económico relativo entre las alternativas curricularmente factibles y es seleccionado mediante la lógica del modelo y el bloque complementario de Solver. Para una matrícula base de 16 participantes, un precio de evaluación de $550.000 y tres versiones

anuales, S2 obtiene un flujo operacional anual positivo aproximado de $2.062.977, pero un VAN a tres años de aproximadamente -$8.309.984. Por lo tanto, la configuración base permite sostener la operación recurrente bajo las condiciones evaluadas, pero no recuperar la inversión inicial dentro del horizonte considerado.

El análisis de capacidad determinó además que el laboratorio dispone de ocho puestos de trabajo y que la configuración preferente corresponde a dos participantes por puesto, equivalente a una matrícula base de 16 personas. Esta capacidad puede extenderse de manera acotada hasta 20 participantes mediante la incorporación limitada de un tercer integrante en determinados puestos, sin requerir la repetición del componente práctico. A partir de 21 participantes debe programarse un segundo grupo secuencial, generándose un incremento discreto en los costos asociados a docencia práctica, apoyo técnico y utilización del laboratorio.

El análisis de puntos de equilibrio y sensibilidad permitió distinguir entre sostenibilidad operacional y recuperación financiera. A un precio de evaluación de $550.000 por participante, la matrícula de equilibrio operacional corresponde aproximadamente a 15 participantes, mientras que dentro de la capacidad de un único bloque práctico el VAN comienza a ser positivo aproximadamente desde 19 participantes.

La configuración de 20 participantes permite una utilización elevada de la capacidad disponible sin abrir un segundo grupo práctico y, bajo el precio de evaluación de $550.000, genera un VAN positivo cercano a $6,97 millones. Para dicha matrícula, el modelo determina además que un precio cercano a $503.000 por participante permite aproximarse al equilibrio financiero dentro del horizonte de tres años.

A partir de estos resultados, se propone como configuración preliminar para validación una alternativa S2 de 40 horas, una matrícula de referencia de 20 participantes, tres versiones anuales como supuesto de planificación y un precio referencial aproximado de $510.000 por participante. Bajo estas condiciones, el modelo obtiene un VAN levemente positivo, cercano a $1 millón dentro del horizonte de tres años. Este resultado presenta una holgura financiera

limitada respecto del punto de equilibrio y permanece condicionado al cumplimiento efectivo de los supuestos considerados.

Estos valores no constituyen una proyección de demanda, una disposición a pagar medida ni una decisión tarifaria institucional. Representan condiciones derivadas del modelo que deberán ser contrastadas mediante validación académica, institucional y comercial antes de una eventual apertura.

De esta forma, el cuarto objetivo permitió no solo estimar recursos y costos, sino también seleccionar una configuración entre las alternativas evaluadas, determinar umbrales de operación y recuperación financiera y proponer condiciones cuantificables para apoyar una eventual decisión institucional de implementación.

4.1.5 Conclusión respecto del objetivo general.

Considerando conjuntamente los resultados de los cuatro objetivos específicos, se concluye que existe pertinencia técnica, normativa y formativa para desarrollar una alternativa especializada en mantenimiento de RPAS/drones dentro de la oferta de educación continua vinculada al área aeronáutica de la Universidad Técnica Federico Santa María.

La investigación permitió establecer que el problema no corresponde a una ausencia absoluta de mantenimiento de drones en Chile, sino a una brecha entre el grado de formalización alcanzado por su operación profesional y el nivel de especialización, sistematicidad y trazabilidad observado en su mantenimiento técnico y formación asociada.

La formación existente en mantenimiento aeronáutico proporciona una base institucional compatible con diversas competencias requeridas, pero no cubre de manera integrada las particularidades asociadas a arquitectura RPAS, propulsión eléctrica, baterías inteligentes, sensores, navegación, comunicaciones, software, firmware, procedimientos de fabricante, diagnóstico y trazabilidad específica de estos sistemas.

A partir de esta situación se evaluaron distintas modalidades académicas y se desarrolló un curso de educación continua con enfoque de especialización técnica. Posteriormente, la evaluación técnico-económica permitió seleccionar una configuración de 40 horas, compuesta por 19 horas conceptuales y 21 horas prácticas o aplicadas, como la menor duración que satisface íntegramente los requerimientos curriculares definidos y presenta el mejor desempeño económico relativo entre las alternativas académicamente admisibles.

La selección de esta configuración debe distinguirse de la decisión de ejecutar efectivamente el curso. Bajo la matrícula base de 16 participantes, la propuesta puede cubrir sus costos recurrentes al precio de evaluación utilizado, pero no recuperar la inversión inicial dentro del horizonte de tres años. El análisis identifica condiciones más favorables cuando se incrementa la utilización de la capacidad del primer bloque práctico, especialmente en torno a una matrícula de 20 participantes.

Por esta razón, se propone utilizar como referencia preliminar de puesta en marcha una configuración de 40 horas, una matrícula de referencia de 20 participantes dentro de una única cohorte práctica y un precio cercano a $510.000 por participante, manteniendo tres versiones anuales como supuesto de planificación. Su ejecución deberá quedar condicionada a una validación comercial de matrícula y precio, a la confirmación institucional de costos e infraestructura y a la validación académica de la capacidad práctica propuesta.

En consecuencia, la pregunta central de la investigación puede responderse señalando que la alternativa formativa más pertinente entre las evaluadas corresponde a un curso de educación continua con enfoque de especialización técnica en mantenimiento de RPAS/drones, cuya puesta en marcha resulta preliminarmente factible bajo una configuración curricular de 40 horas y siempre que se verifiquen las condiciones curriculares, operacionales, institucionales y económico-financieras identificadas mediante el modelo desarrollado.

La investigación no recomienda una apertura automática del programa ni presume una demanda determinada. Su principal resultado consiste en entregar a la Universidad una alternativa académica técnicamente estructurada, una evaluación cuantitativa de sus

condiciones de implementación y criterios verificables para apoyar posteriormente una decisión institucional de puesta en marcha.

4.2 Recomendaciones.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda utilizar el escenario S2 de 40 horas como base curricular para una eventual implementación piloto del curso *Mantenimiento técnico de RPAS/drones: sistemas, diagnóstico, documentación y seguridad operacional*, manteniendo los ocho módulos, sus resultados de aprendizaje y la estructura de 19 horas conceptuales y 21 horas prácticas o aplicadas definida durante la investigación.

La selección de esta configuración no implica recomendar una apertura automática del programa. Antes de ejecutar una primera versión deberán confirmarse los costos institucionales de docencia, sala, laboratorio, apoyo técnico, coordinación, comisión de Educación Continua y difusión, además de actualizar las cotizaciones de equipamiento y verificar la disponibilidad efectiva de los ocho puestos de trabajo considerados en el modelo.

Desde la perspectiva comercial, se recomienda utilizar aproximadamente $510.000 por participante como referencia inicial para una validación de mercado y una matrícula cercana a 20 participantes como condición de utilización favorable de la capacidad de un único bloque práctico. Estos valores corresponden a resultados del modelo y no representan una estimación de demanda, disposición a pagar medida ni un arancel institucional definitivo.

Por esta razón, antes de abrir cada versión deberá recalcularse la matrícula de equilibrio y verificarse el resultado financiero utilizando el precio, costos y condiciones efectivamente aprobados en ese momento. La regla de apertura no debería depender de un número fijo de participantes definido en esta memoria, sino de que la combinación real de matrícula y precio permita satisfacer los criterios económicos establecidos por el modelo.

Para una primera implementación se recomienda privilegiar una única cohorte práctica. La infraestructura permite una configuración preferente de 16 participantes, distribuidos en dos personas por cada uno de los ocho puestos, y una extensión operacional de hasta 20

participantes mediante la incorporación limitada de un tercer integrante en determinados puestos. Esta última configuración deberá validarse académicamente antes de adoptarse como condición habitual.

Si la matrícula supera los 20 participantes, no se recomienda abrir automáticamente un segundo bloque práctico. La decisión deberá considerar el número total de estudiantes confirmados y recalcular los costos y resultados financieros, debido al aumento discreto generado por la repetición de las 21 horas prácticas.

Finalmente, las tres versiones anuales utilizadas en la evaluación deben mantenerse como un supuesto de planificación y no como un compromiso inicial de ejecución. Una primera versión puede utilizarse como instancia de validación y, posteriormente, la frecuencia anual podrá ajustarse de acuerdo con la demanda observada, disponibilidad académica y resultados económicos efectivos.

4.2.1 Validación de una primera ejecución.

Se recomienda que la primera versión del curso cumpla una doble función: entregar la formación propuesta y, al mismo tiempo, validar los principales supuestos curriculares, operacionales y económicos utilizados en esta investigación.

Durante esta ejecución deberá recopilarse información sobre utilización efectiva de horas por módulo, logro de resultados de aprendizaje, suficiencia de herramientas e instrumental, utilización de los puestos prácticos, consumo de materiales, reposición de componentes, costos reales de ejecución y retroalimentación de docentes y participantes. Particular atención deberá prestarse al funcionamiento de actividades con dos y, cuando corresponda, tres participantes por puesto.

La información obtenida permitirá sustituir progresivamente los supuestos preliminares por datos observados y recalibrar parámetros como costos variables, necesidades de equipamiento, duración efectiva de determinadas actividades y capacidad práctica.

Después de la primera ejecución se recomienda efectuar una revisión académica y económica antes de programar nuevas versiones. De esta manera, la mejora de la propuesta podrá basarse en evidencia de implementación y no únicamente en los supuestos utilizados durante su diseño.

4.2.2 Desarrollo hacia reconocimiento DGAC.

Como etapa posterior, se recomienda efectuar una consulta formal a la Dirección General de Aeronáutica Civil para determinar si existe una vía regulatoria aplicable a una eventual aprobación o reconocimiento de la formación propuesta, incluyendo la pertinencia de utilizar la DAN 147 o alguna figura distinta que la autoridad considere adecuada.

Esta consulta deberá realizarse antes de utilizar denominaciones comerciales que puedan interpretarse como reconocimiento oficial por parte de la autoridad aeronáutica, tales como “curso certificado por la DGAC”, “curso aprobado por la DGAC” o expresiones equivalentes.

La investigación entrega antecedentes que podrían constituir una base para una eventual formalización posterior, incluyendo estructura curricular, resultados de aprendizaje, módulos y contenidos, distribución horaria, actividades teórico-prácticas, sistema preliminar de evaluación, requerimientos de infraestructura y equipamiento y criterios generales respecto del perfil de participantes e instructores.

No obstante, estos antecedentes no equivalen al cumplimiento de un proceso regulatorio. Si la DGAC determinara que la DAN 147 resulta aplicable, deberían desarrollarse y someterse a evaluación los antecedentes organizacionales, documentales y de calidad exigidos por dicha norma, además de verificarse las condiciones del personal instructor, registros, instalaciones, equipos y demás requisitos que correspondan.

Por lo tanto, se recomienda considerar la relación con la DGAC como una etapa futura de validación regulatoria y no como una condición actualmente cumplida por la propuesta.

4.2.3 Desarrollo de una línea académica RPAS.

Una vez evaluados los resultados de implementación y consolidada la formación en mantenimiento, podría analizarse el desarrollo de otras iniciativas académicas relacionadas con integración, diseño o sistemas autónomos aplicados a RPAS.

Estas materias no deberían incorporarse directamente al curso de 40 horas desarrollado en esta memoria, debido a que modificarían sus objetivos, resultados de aprendizaje, recursos, carga horaria y evaluación técnico-económica. Cualquier ampliación deberá formularse como una propuesta independiente y someterse a su propio análisis curricular, técnico, regulatorio y económico.

Esta línea futura puede aprovechar capacidades existentes en la Universidad vinculadas con mantenimiento aeronáutico, electricidad, electrónica, control, software y sistemas autónomos, sin alterar el alcance de la alternativa evaluada en la presente investigación.

En caso de que futuras iniciativas incorporen construcción de prototipos o actividades de ensayo en vuelo, deberá distinguirse claramente entre integración académica en laboratorio y operación efectiva de las aeronaves, la cual permanecerá sujeta a las condiciones y autorizaciones aeronáuticas vigentes.

4.2.4 Actualización permanente.

Se recomienda mantener tanto la propuesta curricular como el modelo técnico-económico en una estructura actualizable. La rápida evolución tecnológica de los RPAS, junto con posibles modificaciones regulatorias y variaciones de costos, hace necesario revisar periódicamente los antecedentes utilizados para planificar nuevas versiones.

Antes de cada eventual ejecución deberán verificarse la normativa DGAC vigente, documentación y procedimientos de fabricante, plataformas y tecnologías utilizadas, precios de equipamiento, costos institucionales, disponibilidad de infraestructura, resultados obtenidos en versiones anteriores y condiciones comerciales de matrícula y precio.

Las modificaciones realizadas deberán mantener trazabilidad respecto de su origen y efecto sobre el curso. En particular, los cambios en carga horaria, capacidad práctica, equipamiento, costos o condiciones comerciales deberán reflejarse también en el modelo técnico-económico, de manera que la herramienta conserve coherencia con la configuración efectivamente implementada.

Este proceso de revisión permitirá que la propuesta evolucione a partir de evidencia académica, operacional y económica, evitando que quede asociada permanentemente a los supuestos, tecnologías o valores disponibles al momento de desarrollar esta memoria.

5 Referencias

AACE International. (2008). *Contingency estimating—General principles (Recommended Practice No. 40R-08)*. https://web.aacei.org/docs/default-source/toc/toc_40r-08.pdf

Academia de Drones de Chile. (s. f.-a). *Curso: Mantenimiento de drones*. Recuperado el 28 de mayo de 2026, de https://www.academiadronchile.cl/producto/curso-de-mantenimiento-de-drones/

Academia de Drones de Chile. (s. f.-b). *Curso: Mantenimiento de drones agrícolas*. Recuperado el 28 de mayo de 2026, de https://www.academiadronchile.cl/producto/curso-mantenimiento-de-drones-agricolas/

Agencia Estatal de Seguridad Aérea. (2022, 30 de noviembre). *Mantenimiento UAS/drones*. Ministerio de Transportes y Movilidad Sostenible, Gobierno de España. https://www.seguridadaerea.gob.es/es/ambitos/drones/requisitos-de-uas-drones/mantenimiento-de-uas-drones

Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2026, 27 de marzo). *El Teniente incorpora dron para inspección de sectores de difícil acceso en la mina subterránea*. https://codelco.com/el-teniente-incorpora-dron-para-inspeccion-de-sectores-de-dificil-acceso

Corporación Nacional Forestal. (2022). *Protocolo de utilización de RPA institucional en el SNASPE* (4.ª ed.).

Corporación Nacional Forestal. (2026, 29 de julio). *Respuesta a solicitud de acceso a la información pública folio AR003T0011675: Uso de equipos RPAS/drones en actividades institucionales* [Carta oficial N.º 372/2026 y minutas adjuntas].

Cybersecurity and Infrastructure Security Agency. (s. f.). *Be Air Aware™*. Recuperado el 25 de junio de 2026, de https://www.cisa.gov/topics/physical-security/be-air-aware

Diario Financiero. (2024, 26 de mayo). El impulso de la industria y servicios de drones en Chile. *DF Más*. https://www.df.cl/noticias/site/docs/20240524/20240524134616/suplemento_20240526.pdf

Dirección de Vialidad. (2026). *Respuesta a solicitud de acceso a la información pública AM010T0013893: Uso y mantenimiento de RPAS/drones en actividades institucionales, técnicas, inspección de infraestructura vial, monitoreo territorial y emergencias*.

Dirección General de Aeronáutica Civil. (s. f.). *¿Cómo operar un dron en Chile?* Recuperado el 8 de octubre de 2026, de https://www.dgac.gob.cl/como-operar-un-dron-en-chile-2/

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2023a). *DAN 147: Centros de instrucción y/o entrenamiento de personal aeronáutico de mantenimiento* (Ed. 1, Enm. 2). https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2024/07/DAN_147_Ed_1_Enm_2_2023-1.pdf

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2023b, 20 de julio). *DAN 91: Reglas del aire*. https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2024/07/DAN-91_ED4__ENM5_20JUL2023-2.pdf

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2024a, 27 de mayo). *DAN 151: Operaciones de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS) sobre áreas pobladas* (Ed. 3). https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2024/05/DAN-151-ED3-27MAY2024.pdf

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2024b, 25 de noviembre). *DAN 43: Mantenimiento* (Ed. 2, Enm. 4). https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2024/11/DAN-43-ED2-ENM4-25NOV2024-1.pdf

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2025a, 4 de febrero). *DAN 145: Centros de Mantenimiento Aeronáutico (CMA)* (Ed. 2, Enm. 5). https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2025/02/DAN-145-ED2-ENM5-04FEB2025.pdf

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2025b, 30 de julio). *DAN 119: Normas para obtención de Certificado de Operador Aéreo* (Ed. 4, Enm. 1). https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2025/08/DAN_119_ED4_ENM1_30JUL2025.pdf

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2026a, 1 de abril). *DAN 137: Trabajos aéreos* (Ed. 2, Enm. 1). https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2026/04/DAN-137-ED2-ENM-1-01ABR2026.pdf

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2026b, 22 de junio). *Listado CIAC-CEAC y ECI*. https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2026/06/Listado-CIAC-CEAC-y-ECI-22JUN2026.pdf

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2026c, 6 de octubre). *Empresas RPAS con AOC*. https://www.dgac.gob.cl/drones/empresas-rpa-aoc

Dirección General de Aeronáutica Civil. (2026d, 6 de octubre). *Empresas y operadores RPAS*. https://www.dgac.gob.cl/drones/empresas-rpa

DJI. (2024). *Matrice 350 RTK user manual* (Version 1.2). https://dl.djicdn.com/downloads/matrice_350_rtk/20240814/Matrice_350_RTK_User_Manual_v1.2_en.pdf

DJI. (s. f.). *DJI Maintenance Program*. Recuperado el 28 de mayo de 2026, de https://repair.dji.com/help/content?customId=01700006896&documentType&lang=en&paperDocType=ARTICLE&re=US&spaceId=17

DJI Enterprise. (s. f.). *Enterprise Maintenance*. Recuperado el 28 de mayo de 2026, de https://enterprise.dji.com/enterprise-maintenance

Drone Service Chile. (s. f.). *Inicio*. Recuperado el 28 de mayo de 2026, de https://droneservice.cl/

Electronic Code of Federal Regulations. (2026). *14 CFR Part 107: Small unmanned aircraft systems*. Recuperado el 25 de junio de 2026, de https://www.ecfr.gov/current/title-14/chapter-I/subchapter-F/part-107

European Union Aviation Safety Agency. (2024, 10 de julio). *Easy Access Rules for Unmanned Aircraft Systems (Regulations (EU) 2019/947 and 2019/945): Revision from July 2024*. https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-unmanned-aircraft-systems-regulations-eu

European Union Aviation Safety Agency. (2025, 5 de diciembre). *Easy Access Rules for Information Security (Regulations (EU) 2023/203 and 2022/1645): Revision from December 2025*. https://www.easa.europa.eu/en/document-library/easy-access-rules/easy-access-rules-information-security-regulations-eu-2023203-and-20221645

Federal Aviation Administration. (2016). *Remote pilot – Small unmanned aircraft systems study guide* (FAA-G-8082-22). https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/remote_pilot_study_guide.pdf

Geoactivos. (s. f.). *Curso de mantenimiento de drones*. Recuperado el 8 de octubre de 2026, de https://geoactivos.cl/products/curso-de-mantenimiento-de-drones

Geocom. (s. f.). *Servicio Técnico Dron / UAS*. Recuperado el 28 de mayo de 2026, de https://www.geocom.cl/collections/servicios-dron-uas/servicio-tecnico-dron

Ilustre Municipalidad de Santiago. (2026, 28 de julio). *Respuesta a solicitud de acceso a la información pública MU-17762: Uso y mantenimiento de RPAS/drones por parte de la Municipalidad de Santiago* [ORD. N.º E-1031/2026 y documentos adjuntos].

International Civil Aviation Organization. (2015). *Manual on remotely piloted aircraft systems (RPAS)* (Doc. 10019). https://www.dhmi.gov.tr/PublishingImages/Sayfalar/Ssd/InsansizHavaTrafikSbMd/KurumsalBilgiveDokumanlar/ICAO%20Doc.10019.pdf

International Civil Aviation Organization. (2017). *ICAO RPAS concept of operations (CONOPS) for international IFR operations*. https://www.icao.int/sites/default/files/left-menu-pdfs/ICAO%20RPAS%20CONOPS.pdf

Lancashire, H., & Vanhoestenberghe, A. (2021). Rapid conversion of a biomedical engineering laboratory from in person to online. *Biomedical Engineering Education, 1*(1), 181–186. https://doi.org/10.1007/s43683-020-00031-y

Ley N.º 20.285. Sobre Acceso a la Información Pública. Diario Oficial de la República de Chile, 20 de agosto de 2008. https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=276363

Madina Díaz, C. (2024, 2 de septiembre). *Aeronáutica civil de Chile, en vuelo hacia el centenario*. Dirección General de Aeronáutica Civil. https://www.dgac.gob.cl/aeronautica-civil-de-chile-en-vuelo-hacia-el-centenario/

Prodrone. (s. f.). *Servicio técnico de drones en Chile*. Recuperado el 28 de mayo de 2026, de https://prodrone.cl/servicio-tecnico-de-drones-y-reparacion-dji-parrot/

Sapag Chain, N., & Sapag Chain, R. (2008). *Preparación y evaluación de proyectos* (5.ª ed.). McGraw-Hill Interamericana. https://bibliotecadigital.usm.cl/info/preparacion-y-evaluacion-de-proyectos-00644804

Servicio Agrícola y Ganadero. (2026, 20 de julio). *Respuesta a solicitud de acceso a la información pública AR006T0015939: Uso y mantenimiento de RPAS/drones por parte del Servicio Agrícola y Ganadero* [Carta N.º 5636/2026].

Servicio de Impuestos Internos. (2026). *UTM - UTA - IPC 2026*. https://www.sii.cl/valores_y_fechas/utm/utm2026.htm

The Insight Partners. (2026). *Drone inspection and monitoring market size and forecast (2025–2034)*. https://www.theinsightpartners.com/reports/drone-inspection-and-monitoring-market

Universidad de Chile. (2024). *Flying Challenge*. Área para el Aprendizaje de Ingeniería y Ciencias, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas. https://a2ic.ing.uchile.cl/proyectos-de-innovaci%C3%B3n-docente/oto%C3%B1o-2024

Universidad Técnica Federico Santa María. (s. f.-a). *Ingeniería en Aviación Comercial*. Recuperado el 8 de octubre de 2026, de https://usm.cl/admision/carreras/ingenieria-en-aviacion-comercial/

Universidad Técnica Federico Santa María. (s. f.-b). *Técnico Universitario en Mantenimiento Aeronáutico*. Recuperado el 28 de mayo de 2026, de https://usm.cl/admision/carreras/tecnico-universitario-en-mantenimiento-aeronautico

Universidad Técnica Federico Santa María. (2026, 28 de septiembre). *Donan plataforma aérea al Departamento de Electrotecnia e Informática de la Sede Viña del Mar*. https://usm.cl/noticias/donan-plataforma-aerea-al-departamento-de-electrotecnia-e-informatica-de-la-sede-vina-del-mar/

Van den Beemt, A., Groothuijsen, S., Özkan, L., & Hendrix, W. (2023). Remote labs in higher engineering education: Engaging students with active learning pedagogy. *Journal of Computing in Higher Education, 35*(2), 320–340. https://doi.org/10.1007/s12528-022-09331-4

6 Anexos

.

Anexo A. Ficha de entrevista exploratoria a representante DGAC

El presente anexo documenta la entrevista exploratoria semiestructurada utilizada como antecedente cualitativo complementario para el diagnóstico normativo, técnico y formativo del mantenimiento de RPAS/drones. La información se recoge con fines académicos y no constituye un pronunciamiento institucional oficial de la autoridad aeronáutica.

Fecha	6 de julio de 2026.
Institución	Dirección General de Aeronáutica Civil (DGAC).
Participante	Representante DGAC (identificación institucional utilizada en esta memoria).
Modalidad	Entrevista exploratoria semiestructurada.
Propósito	Complementar el análisis sobre operación, certificación y registro de RPAS/drones y contextualizar la situación de su mantenimiento y formación técnica en Chile.
Ejes temáticos	Normativa y certificación RPAS; condición técnica y seguridad operacional; prácticas y responsabilidades asociadas al mantenimiento; documentación y procedimientos de fabricante; posible especialización formativa.
Uso en la investigación	Fuente cualitativa de contraste con normativa DGAC, documentación técnica y resultados del levantamiento institucional. Sus observaciones no se generalizan estadísticamente al sector.
Forma de citación	(representante DGAC, comunicación personal, 6 de julio de 2026).

Fuente: Elaboración propia a partir de la entrevista exploratoria del 6 de julio de 2026.

Anexo B. Ficha de caracterización curso de mantenimiento de drones

La ficha sistematiza, mediante redacción propia, información de un antecedente programático recibido de la Academia de Drones de Chile. Su finalidad es respaldar la caracterización exploratoria de la oferta privada y la comparación de contenidos realizada en la sección 3.3.3, sin reproducir íntegramente el material del proveedor.

Entidad	Academia de Drones de Chile.
Nombre de la oferta	Curso de mantenimiento de drones.
Tipo de antecedente	Información programática y comercial de capacitación privada.
Duración declarada	Una jornada de 8 horas cátedra.
Metodología declarada	Contenidos teóricos y actividades prácticas.
Orientación formativa	Reconocimiento de componentes y de fallas comunes, mantenimiento básico y preventivo, limpieza y familiarización con herramientas y aplicaciones asociadas a drones.
Contenidos identificados	Fundamentos de electrónica y hardware; motores, sensores, baterías y controles; software y aplicaciones DJI; diagnóstico básico de fallas físicas y de software; desmontaje parcial; limpieza y recomendaciones de conservación.

Utilidad para la memoria	Referencia de oferta nacional de corta duración y de los contenidos técnicos que ya se abordan en la capacitación privada.
Alcance de la comparación	La ficha no permite concluir equivalencia académica, calidad comparada, habilitación DGAC ni disposición a pagar por el curso propuesto por la USM.

Fuente: *Elaboración propia a partir del antecedente programático recibido y de Academia de Drones de Chile (s. f.-a).*

Anexo C. Ficha de caracterización mantenimiento y reparación de drones agrícolas DJI.

La ficha sistematiza, mediante redacción propia, los antecedentes del programa de mantenimiento y reparación de drones agrícolas DJI recibidos de la Academia de Drones de Chile. Se utiliza exclusivamente como evidencia comparativa de contenidos técnicos y de profundidad formativa presentes en la oferta privada.

Entidad	Academia de Drones de Chile.
Nombre de la oferta	Mantenimiento y reparación de drones agrícolas DJI.
Tipo de antecedente	Programa técnico de capacitación privada orientado a una familia de plataformas agrícolas.
Duración declarada	Dos jornadas. No se atribuye un número de horas cronológicas no especificado en el antecedente.
Orientación formativa	Diagnóstico de fallas, mantenimiento preventivo, reparación, sustitución de componentes, calibración y verificación posterior a la intervención.
Contenidos de la primera jornada	Inspección y limpieza de elementos críticos; métodos y herramientas de diagnóstico; interpretación de alertas, errores y telemetría; desmontaje seguro; reconocimiento de componentes electrónicos; aplicación de mantenimiento y diagnóstico.
Contenidos de la segunda jornada	Reparación de sistemas electrónicos; sustitución de motores, controladores ESC, hélices y componentes de aviónica; revisión de navegación; calibración de sensores; verificaciones y pruebas posteriores; estudio de fallas y casos de aplicación.
Competencias declaradas	Mantenimiento preventivo, diagnóstico, reparación especializada, reemplazo de componentes y calibración de plataformas agrícolas DJI.
Utilidad para la memoria	Referencia de mayor especialización técnica que un curso básico; permite contrastar contenidos de mantenimiento aplicado, diagnóstico y procedimientos específicos de fabricante.
Alcance de la comparación	No constituye programa universitario equivalente ni acredita certificación aeronáutica formal. Su orientación específica a DJI agrícola difiere del enfoque transversal de la propuesta USM.

Fuente: *Elaboración propia a partir del antecedente programático recibido y de Academia de Drones de Chile (s. f.-b).*

Anexo D. Modelo técnico-económico de evaluación de puesta en marcha

Como respaldo de la evaluación desarrollada en la sección 3.6, se incorpora como archivo digital complementario el modelo técnico-económico elaborado en Microsoft Excel, denominado modelo_tecnico_economico_rpas_drones.xlsx.

La planilla contiene los parámetros de entrada, antecedentes de mercado, estructura curricular, escenarios de duración, dimensionamiento de equipamiento, costos de ejecución, inversión inicial, capital de trabajo, indicadores económico-financieros, análisis de sensibilidad y selección de alternativas mediante restricciones curriculares y herramientas de optimización.

El archivo dispone de 16 hojas de trabajo organizadas para facilitar la revisión de supuestos, fórmulas, resultados y fuentes de información. Su carácter parametrizado permite modificar las condiciones de evaluación y examinar sus efectos sin reconstruir el modelo.

Los valores de matrícula, precio y frecuencia anual utilizados corresponden a escenarios de análisis y no constituyen estimaciones de demanda ni decisiones institucionales definitivas.

Archivo complementario: modelo_tecnico_economico_rpas_drones.xlsx..

https://drive.google.com/drive/folders/1k6uOCXlbZN2ecSt3cuXBwHoGQ2z0v_Ba?usp=sharing

Fuente: *Elaboración propia.*

Anexo E. Repositorio de respuestas obtenidas mediante ley de transparencia

Como respaldo del levantamiento de información desarrollado en la sección 3.3.2, se dispone de un repositorio digital complementario que reúne las respuestas institucionales recibidas mediante solicitudes de acceso a información pública, conforme a la Ley N.º 20.285.

El repositorio contiene antecedentes proporcionados por el Servicio Agrícola y Ganadero, la Dirección de Vialidad, la Corporación Nacional Forestal y la Ilustre Municipalidad de Santiago, utilizados para caracterizar prácticas de utilización, mantenimiento, documentación y gestión técnica de RPAS/drones.

Los documentos se ponen a disposición para facilitar la trazabilidad y verificación de los antecedentes analizados, resguardando los datos personales y las restricciones de publicidad que correspondan.

Repositorio documental: https://drive.google.com/drive/folders/1LRpqW7MjWdONOfkq1m7MtoTKNr3T_uRF?usp=sharing