

CÓNDORUTM

REVISTA DE GESTIÓN DE TRÁNSITO NO TRIPULADO



El cielo bajo *también se controla*

Qué es la gestión de tránsito de aeronaves no tripuladas, por qué el espacio aéreo de baja cota exige un sistema propio y cómo lo estamos resolviendo en Chile.



Un dron que vuela a ochenta metros
sobre una ciudad no está fuera
del espacio aéreo.

Está dentro de un espacio aéreo
que todavía nadie ve.



FICHA
EDITORIAL

CÓNDOR UTM

Revista de gestión de tránsito no tripulado · Edición V.01

CAMPO	DETALLE
Título	CÓNDOR UTM — El cielo bajo también se controla
Edición	V.01 · Septiembre de 2026
Editor responsable	Iván Araos Mancilla — Gerente General, CENAE SpA
Entidad editora	Centro de Navegación Aérea de Chile SpA (CENAE SpA), AOC N° 1626
Entidad Educativa	Escuela de Navegación Aérea de Chile SpA (ENAE SpA), AOC N° 1521
Naturaleza	Publicación técnico-divulgativa. No constituye documento normativo ni asesoría legal.
Ámbito	Gestión de tránsito de aeronaves no tripuladas (UTM / U-space)
Idioma	Español (Chile). Terminología conforme a OACI, EASA y ASTM.
Distribución	Autoridad aeronáutica, industria UAS, academia y socios estratégicos.
Sistema tipográfico	IBM Plex Sans, Serif, Condensed y Mono (SIL Open Font License).

ADVERTENCIA EDITORIAL

Esta publicación describe conceptos, arquitecturas y estados de desarrollo. **No reemplaza ni interpreta la normativa aeronáutica chilena vigente.** Toda operación de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia en Chile se rige por la DAN 151 y las demás normas que dicte la Dirección General de Aeronáutica Civil.

Las referencias a documentos de OACI, EASA, ASTM, JARUS e ISO se entregan como marco conceptual. La versión autoritativa de cada estándar es la publicada por el organismo emisor.

Las cifras de conjuntos de datos geoespaciales corresponden al estado de la base de CÓNDOR UTM a la fecha de cierre de esta edición y están sujetas a actualización continua.

AGRADECIMIENTOS

Esta edición recoge el trabajo acumulado del programa CÓNDOR UTM y las conversaciones sostenidas durante 2026 con la autoridad aeronáutica, con operadores, con la academia y con proveedores tecnológicos de Europa y América: la discrepancia técnica bien argumentada ha sido, en cada caso, más útil que el acuerdo cómodo.

Un reconocimiento particular a quienes sostienen el oficio invisible —controladores de tránsito aéreo, oficiales de operaciones e inspectores—: el sistema que estas páginas describen no existe contra ese oficio, existe para extenderlo hacia abajo.

CONTENIDOS

Índice

de esta edición

Carta del director — Lo que no se ve, no se gobierna	7
Cómo leer esta edición	10
Acrónimos y abreviaturas	12
01 El otro espacio aéreo	14
La franja de 0 a 120 metros · Por qué el ATC no escala hacia abajo Anatomía del punto ciego · Chile en cifras: el cielo que hay que digitalizar	
02 Qué es realmente el UTM	24
La definición de OACI · Los servicios U-space · Actores y roles El andamiaje de estándares · Anexo: cronología del consenso internacional	
03 La Operación 4D	35
El objeto que ordena el sistema · Ciclo de vida en ocho pasos Deconflicción estratégica · Conformidad en vivo · SORA: de trámite a cálculo	
04 La matrícula electrónica	45
Qué difunde un dron · Difusión local y en red · La red de sensores Del identificador a la traza: el puente con la vigilancia convencional	
05 El gemelo digital de la baja cota	54
Obstáculos finos · Densidad de población y riesgo terrestre Proteger y digitalizar · Fuentes, linaje y actualización	
06 CÓNDOR: la arquitectura chilena	63
Tres capas y un contrato · El Servicio de Información Común La ventana estratégica · Matriz de conformidad · Soberanía del dato	
07 El camino regulatorio	73
Facultades indelegables y modelo híbrido · La norma chilena El precedente estadounidense · Sandbox y compuertas · Anexo: diez preguntas	
Qué significa esto para usted	84
08 Ocho tesis para el cielo bajo	86
Referencias y bibliografía	89

CARTA DEL DIRECTOR

Lo que no se ve, no se gobierna

Durante veintiocho años trabajé separando aeronaves. Aprendí que un controlador de tránsito aéreo no administra aviones: administra incertidumbre. Todo el edificio del control de tránsito —la fraseología, los mínimos de separación, la estructura de rutas, la redundancia de los sistemas— existe para reducir esa incertidumbre a un valor que la sociedad esté dispuesta a aceptar.

Cuando el dron irrumpió en la aviación civil, la industria cometió un error de encuadre que todavía pagamos: lo tratamos como una aeronave pequeña. Lo era, en sentido físico. Pero en sentido aeronáutico era otra cosa. Era el primer objeto volador masivo de la historia que opera **por debajo del alcance de todos los sistemas con los que aprendimos a ver el cielo**. No lo pinta un radar primario de ruta. No lo declara un transpondedor. No lo escucha una frecuencia. No lo anota un plan de vuelo. Está ahí y, para la infraestructura aeronáutica clásica, simplemente no existe.

28

años de servicio como
controlador de tránsito
aéreo

Si esta edición deja una idea central, es esta: el problema del dron no es de tamaño, sino de **visibilidad institucional**. Y donde no hay visibilidad no hay autoridad posible, porque la autoridad aeronáutica no puede regular un tránsito que no puede observar, ni fiscalizar una operación que no puede reconstruir, ni investigar un incidente cuya traza nunca se registró.

El mundo llamó a la respuesta *UTM* —gestión de tránsito de sistemas de aeronaves no tripuladas— y Europa la llamó *U-space*. El nombre importa menos que el enfoque: UTM no replica el control de tránsito aéreo a menor escala. Se estructura como un sistema **orientado a servicios y centrado en el operador**, donde la mayor parte de las decisiones se toman antes del despegue, de máquina a máquina, y donde el rol humano de la autoridad se concentra en la excepción, no en el trámite.

El dron no necesita un controlador. Necesita un sistema que sepa dónde está, qué se le autorizó y si se está saliendo de eso.

— Iván Araos Mancilla · Director de la edición

CÓNDOR UTM surgió de una necesidad operacional concreta. En una mesa de trabajo, un operador nos preguntó cómo demostrar ante la autoridad que su vuelo se mantuvo dentro del volumen autorizado, y la única respuesta disponible era una planilla. Ahí quedó claro que la brecha no era solo normativa: faltaba un **registro digital confiable del hecho aeronáutico**.

Esta primera edición tiene un propósito deliberadamente explicativo: presenta qué es el UTM en el marco de OACI y de la regulación europea; qué servicios lo componen y quién los presta; por qué la franja de cero a ciento veinte metros sobre el terreno funciona, a efectos prácticos, como otro espacio aéreo; y cómo hemos ido resolviendo cada pieza en Chile a partir de lo que efectivamente está construido y funcionando hoy.

También expone lo que aún falta y lo identifica de manera explícita en una matriz de conformidad. En aviación, la credibilidad técnica exige declarar la brecha antes de que la encuentre el auditor; presentar como completo un sistema que todavía tiene pendientes debilita su posición técnica.

Quiero cerrar esta carta con una precisión institucional. En Chile, el control de tránsito aéreo y la ayuda a la navegación aérea son facultades del Estado, y esa posición nos parece correcta. CÓNDOR no compite con la autoridad ni pretende sustituirla. **Amplía su capacidad de observación**. El modelo que proponemos es híbrido: la autoridad conserva lo indelegable y decide; la industria aporta la

plataforma, opera los servicios accesorios que la autoridad determine y responde por ellos bajo supervisión. Es el modelo que Europa escribió como reglamento y que Estados Unidos construyó como práctica. No hay que inventarlo. Hay que adaptarlo.

Falta trabajo. Falta norma. Falta que la conversación entre industria y autoridad deje de ser una secuencia de oficios y se convierta en ingeniería conjunta. Pero el cielo bajo ya está ocupado, y se está ocupando más rápido de lo que avanzan nuestros expedientes. Esta revista es una invitación a mirarlo de frente.



Iván Araos Mancilla

Gerente General · CENAE SpA | Director del programa
CÓNDOR UTM

Controlador de Tránsito Aéreo (R) (28 años de servicio en la
DGAC y 36 años en el mundo de la aviación). Consultor
sénior UAS/UAM/AAM

FIGURA 01 Retrato editorial del director.

GUÍA DE LECTURA

Cómo leer esta edición

La publicación está pensada para lectores con responsabilidades distintas. Por eso cada capítulo ofrece tres niveles de profundidad y permite una lectura selectiva, sin obligar a recorrerlo completo.

LOS TRES NIVELES DE LECTURA

NIVEL	DÓNDE VIVE	PARA QUIÉN
Argumento	La entradilla en serif al inicio de cada sección y las citas destacadas.	Directivos, autoridad, prensa especializada. Lectura de quince minutos de punta a cabo.
Desarrollo	El cuerpo de texto justificado.	Operadores, pilotos, jefes de operaciones, académicos y consultores.
Evidencia	Tablas, matrices, datos marginales y referencias normativas.	Ingenieros, inspectores, auditores y equipos de certificación.

Convenciones del sistema

- **Columna marginal** — a la izquierda de cada página viven los antetítulos, los datos destacados y las fichas de figura. Es la zona de navegación rápida: se puede recorrer la revista leyendo solo el margen.
- **Recuadros azules** — definiciones canónicas y posiciones doctrinarias del programa. Es lo que CENAE sostiene, no lo que la norma obliga.
- **Recuadros claros** — datos duros, cifras verificables y advertencias metodológicas.
- **Recuadros ámbar** — distinciones entre recomendación técnica y exigencia normativa.
- **Tablas de cabecera azul** — evidencia estructurada. Cuando la fuente es un conjunto de datos propio, se declara al pie.
- **Figuras y esquemas** — las capturas operacionales se identifican como tales; los esquemas conceptuales y las imágenes referenciales se presentan como apoyo explicativo. El pie indica su alcance y evita confundir una representación editorial con una interfaz operativa o una fuente normativa.
- **Texto monoespaciado** — identificadores técnicos, campos de datos y códigos de mensaje.

UNA DISTINCIÓN QUE RECORRE TODO EL DOCUMENTO

Cada vez que esta edición afirma algo, distingue entre **recomendación técnica** y **exigencia normativa**. Una recomendación técnica es lo que el estado del arte aconseja; una exigencia normativa es lo que un texto legal vigente obliga. Confundirlas es el error más caro de la consultoría aeronáutica: lleva a proyectos que cumplen el estándar y no cumplen la ley, o al revés.

Cuando el texto dice «**la norma exige**», existe un instrumento citable. Cuando dice «**la práctica internacional recomienda**», existe un estándar de consenso pero no una obligación en Chile. Cuando dice «**CÓNDOR adopta**», es una decisión de diseño propia y discutible.

VOCABULARIO

Acrónimos y abreviaturas

El vocabulario del UTM mezcla tres tradiciones: la aeronáutica clásica de OACI, la regulación europea de U-space y los estándares de consenso de ASTM. Esta tabla fija el significado con el que se usan en esta edición.

AAM	Advanced Air Mobility — movilidad aérea avanzada
ADS-B	Automatic Dependent Surveillance–Broadcast — vigilancia dependiente automática por difusión
AFTN	Aeronautical Fixed Telecommunication Network — red fija de telecomunicaciones aeronáuticas
AGL	Above Ground Level — altura sobre el terreno
AIM	Aeronautical Information Management — gestión de información aeronáutica
AIP	Aeronautical Information Publication — publicación de información aeronáutica
ANSP	Air Navigation Service Provider — proveedor de servicios de navegación aérea
ARC	Air Risk Class — clase de riesgo aéreo (SORA)
ASTERIX	Formato normalizado de intercambio de datos de vigilancia (EUROCONTROL)
ASTM	ASTM International — organismo de estándares de consenso
ATC	Air Traffic Control — control de tránsito aéreo
ATFM	Air Traffic Flow Management — gestión de afluencia de tránsito aéreo
ATM	Air Traffic Management — gestión de tránsito aéreo
ATZ	Aerodrome Traffic Zone — zona de tránsito de aeródromo
BVL05	Beyond Visual Line of Sight — más allá de la línea visual directa
C2	Command and Control — enlace de mando y control
CIS / CISP	Common Information Service (Provider) — servicio y proveedor de información común
CTR	Control Zone — zona de control
CWP	Controller Working Position — posición de trabajo del controlador
DAN	Norma Aeronáutica Chilena (DGAC)
DAR	Dynamic Airspace Reconfiguration — reconfiguración dinámica del espacio aéreo
DEM	Digital Elevation Model — modelo digital de elevación
DGAC	Dirección General de Aeronáutica Civil (Chile)
DSS	Discovery and Synchronization Service — descubrimiento y sincronización entre proveedores
EASA	European Union Aviation Safety Agency
FAA	Federal Aviation Administration (EE.UU.)
FIR	Flight Information Region — región de información de vuelo

FPL	Flight Plan — plan de vuelo
GRC / iGRC	Ground Risk Class (intrinsic) — clase de riesgo terrestre intrínseca (SORA)
ISMS	Information Security Management System — gestión de seguridad de la información
JARUS	Joint Authorities for Rulemaking on Unmanned Systems
MTC	Medium Term Conflict Detection — detección de conflictos a medio plazo
MTOM	Maximum Take-Off Mass — masa máxima de despegue
PSR	Primary Surveillance Radar — radar primario de vigilancia: detecta el eco de la aeronave sin cooperación de ésta
NOTAM	Notice to Air Missions — aviso a los operadores aéreos
OACI / ICAO	Organización de Aviación Civil Internacional
OIR	Operational Intent Reference — referencia de intención operacional (ASTM F3548)
RID	Remote Identification — identificación remota
RPA / RPAS	Remotely Piloted Aircraft (System) — aeronave y sistema pilotado a distancia
SSR	Secondary Surveillance Radar — radar secundario de vigilancia: interroga al transpondedor de la aeronave, que responde con su identidad y nivel
SAIL	Specific Assurance and Integrity Level — nivel de garantía e integridad (SORA)
SDSP	Supplemental Data Service Provider — proveedor de datos suplementarios
SMS	Safety Management System — sistema de gestión de la seguridad operacional
SNASPE	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado (Chile)
SORA	Specific Operations Risk Assessment — evaluación de riesgo de operaciones específicas
STCA	Short Term Conflict Alert — alerta de conflicto a corto plazo
UAS	Unmanned Aircraft System — sistema de aeronave no tripulada
USS / USSP	UAS Service Supplier / U-space Service Provider — proveedor de servicios U-space
UTM	UAS Traffic Management — gestión de tránsito de aeronaves no tripuladas
VLOS	Visual Line of Sight — línea visual directa
VLL	Very Low Level — muy baja cota: la franja de espacio aéreo por debajo de los 120 m (400 ft) sobre el terreno en que opera el vuelo no tripulado
VSD	Vertical Situation Display — presentación de situación vertical

NOTA SOBRE TRADUCCIÓN

En esta edición se usa **UTM** como término genérico global y **U-space** cuando la referencia es específicamente al marco regulatorio de la Unión Europea. No son sinónimos exactos: U-space es una implementación regional y jurídicamente vinculante de la idea de UTM.

Se prefiere **aeronave no tripulada** o **sistema de aeronave pilotada a distancia (RPAS)** sobre «dron» en los pasajes técnicos, y se acepta «dron» en los pasajes divulgativos, siguiendo la práctica de la propia OACI.

01

CAPÍTULO UNO

El otro espacio aéreo



Por debajo de los ciento veinte metros ocurre casi todo el vuelo no tripulado del país, y es la única franja del espacio aéreo chileno sobre la que el Estado no tiene una imagen en tiempo real.

- La franja de 0 a 120 metros sobre el terreno
- Por qué el control de tránsito aéreo no escala hacia abajo
- Anatomía del punto ciego institucional
- Chile en cifras: el cielo que hay que digitalizar



La franja de 0 a 120 metros

Todo el edificio de la aviación civil se construyó mirando hacia arriba. Las rutas, los niveles de vuelo, las áreas terminales, las cartas de aproximación, la cobertura radar y hasta el reparto de responsabilidades entre dependencias están diseñados para un tránsito que sube. El vuelo no tripulado hizo algo que ese edificio no previó: se quedó abajo, y se quedó abajo en masa.

La cifra de ciento veinte metros sobre el terreno —cuatrocientos pies— no es arbitraria ni chilena. Es el techo que la mayoría de las autoridades aeronáuticas del mundo fijó para la operación rutinaria de aeronaves no tripuladas pequeñas, porque es la altura por debajo de la cual la probabilidad de encuentro con aviación tripulada en ruta se vuelve despreciable. Esa elección fue acertada y resolvió el problema urgente: separar por altitud lo que no se podía separar por procedimiento.

Pero la separación por altitud creó, sin quererlo, un régimen de excepción. Todo lo que ocurre bajo esa cota queda fuera del alcance de la infraestructura con la que el Estado observa el cielo. Un radar secundario de ruta no interroga a un objeto de dos kilos sin transpondedor. Un radar primario de aproximación, cuando existe, lo confunde con retorno de terreno o lo filtra por diseño. El ADS-B —la tecnología que hoy sostiene la vigilancia moderna— depende de que la aeronave transmita su propia posición, y una aeronave no tripulada pequeña no lleva ese equipo ni tiene espacio, energía o espectro para llevarlo.

El resultado es una asimetría incómoda: la franja del espacio aéreo donde ocurre la mayor cantidad de operaciones aéreas del país es la única sobre la que no existe imagen operacional. Y no se trata de una carencia tecnológica puntual que se resuelva comprando un sensor mejor. Se trata de que **la baja cota es un dominio distinto**, con una física distinta, una densidad distinta y un perfil de riesgo distinto.

Tres diferencias que lo cambian todo

La primera es la **densidad de obstáculos**. Sobre los trescientos metros, el espacio aéreo está esencialmente vacío: es aire. Bajo los ciento veinte, está lleno de cosas construidas por el hombre. Torres de telecomunicaciones, chimeneas industriales, grúas de obra que aparecen y desaparecen en semanas, tendidos de alta tensión cuyos conductores son prácticamente invisibles para un piloto remoto, aerogeneradores, edificios de altura irregular calle por calle. El mapa que se necesita para volar ahí no es una carta aeronáutica: es un modelo tridimensional del terreno construido.

La segunda es la **población bajo la trayectoria**. En ruta, el riesgo dominante es la colisión entre aeronaves. En baja cota urbana, el riesgo dominante es el impacto contra personas en tierra. Esto invierte la lógica de la seguridad operacional: la variable crítica ya no es la separación horizontal entre tránsitos, sino la densidad de personas por kilómetro cuadrado bajo el volumen de operación. Es exactamente la variable que la metodología SORA convirtió en el corazón del análisis de riesgo, y es una variable que un controlador no puede evaluar mirando una pantalla de tránsito.

La tercera es la **escala**. Un centro de control gestiona decenas de aeronaves simultáneas y ese número está acotado por la capacidad cognitiva humana. La baja cota, en un escenario maduro de entrega, inspección, agricultura de precisión, seguridad y emergencia, admite órdenes de magnitud más. Ningún esquema basado en que una persona autorice, vigile y coordine cada vuelo puede escalar a ese volumen. No es un problema de dotación; es un problema de paradigma.



FIGURA 02 Estratificación conceptual del espacio aéreo sobre una ciudad chilena.

CAPÍTULO 01 · SECCIÓN 1.2

Por qué el ATC no escala hacia abajo

La tentación natural de cualquier autoridad aeronáutica es resolver el problema del dron con la herramienta que ya domina: el control de tránsito aéreo. Es una tentación comprensible y es un error de diseño. El control de tránsito aéreo es una tecnología extraordinaria para el problema que resuelve, y ese no es este problema.

El control de tránsito aéreo es, en esencia, un sistema **táctico y centrado en el humano**. Un controlador observa una situación, la proyecta mentalmente algunos minutos hacia adelante, detecta un conflicto y emite una instrucción por voz que el piloto ejecuta. Todo el sistema —la fraseología estandarizada, los mínimos de separación, la estructura de sectores, la rotación de turnos, los procedimientos de traspaso— está diseñado alrededor de esa interacción humana en tiempo real y de sus límites.

El UTM es, en esencia, un sistema **estratégico y centrado en el operador**. La mayor parte de las decisiones no se toman en vuelo sino antes del despegue, cuando el operador declara una intención de operación en cuatro dimensiones —un volumen de espacio y una ventana de tiempo— y el sistema la contrasta automáticamente contra las zonas prohibidas, las restricciones vigentes y las intenciones ya autorizadas de otros operadores. Si no hay conflicto, se autoriza sin intervención humana. Si lo hay, el sistema propone alternativas antes de escalar a una persona.

TABLA 1.1 — DOS PARADIGMAS, NO DOS VERSIONES DEL MISMO PARADIGMA

DIMENSIÓN	CONTROL DE TRÁNSITO AÉREO (ATC)	GESTIÓN DE TRÁNSITO NO TRIPULADO (UTM / U-SPACE)
Sujeto del sistema	El controlador. Un humano separa tránsitos.	El operador. Servicios automáticos habilitan y verifican.
Momento de la decisión	Táctico: durante el vuelo, en segundos o minutos.	Estratégico: antes del despegue, sobre la intención declarada.
Interfaz	Consola de situación, frecuencia de voz, franjas de progreso.	Portal web, interfaz de programación, aplicación del piloto.
Naturaleza de la separación	Instrucción imperativa emitida por la autoridad.	Deconflicción previa del volumen y verificación de conformidad.
Automatización	Humano en el bucle para cada decisión de separación.	Máquina a máquina, federado, humano en la excepción.
Escalabilidad	Acotada por la carga de trabajo del controlador.	Acotada por la capacidad de cómputo y la calidad del dato.
Fuente de la posición	Radar y vigilancia dependiente cooperativa (ADS-B, Modo S).	Identificación remota difundida o en red, complementada con sensores.
Responsabilidad de la separación	Del proveedor de servicios de tránsito aéreo.	Compartida: el operador cumple el volumen; el sistema lo verifica.

La diferencia tiene consecuencias operacionales y económicas concretas. Una autoridad que encuadre el UTM como «control de tránsito para drones» diseñará un sistema que necesita dotación humana proporcional al tráfico, y descubrirá que el modelo es financieramente insostenible en cuanto la operación comercial despegue. Un proveedor tecnológico que cometa el mismo error construirá una consola de situación preciosa que resuelve el diez por ciento del problema y no vende, porque el operador no necesita mirar una pantalla: necesita que le autoricen el vuelo, que le digan si puede volar donde quiere y que le quede registro de que lo hizo bien.

La consola de situación es la ventana por la que el Estado mira el sistema. No es el sistema.

— Principio de diseño del programa CÓNDOR

Esto no significa que la vigilancia táctica sea prescindible. Significa que es **la segunda capa, no la primera**. Y hay evidencia internacional directa sobre este punto: el ecosistema de UTM que opera espacio aéreo compartido en Estados Unidos desde 2025 lo hace exclusivamente sobre coordinación estratégica entre proveedores, sin radar, sin redes de seguridad tácticas y sin intercambio de datos de vigilancia en formato convencional. Funciona porque el problema que resuelve —que dos operadores no planifiquen el mismo volumen en la misma ventana horaria— es un problema estratégico.

Anatomía del punto ciego

El punto que debe precisarse es qué parte de la operación no ve hoy el Estado. La existencia de drones, sus registros y la acreditación de pilotos sí son conocidas; lo que falta es la cadena digital que conecta el permiso con el hecho operacional.

El ciclo administrativo de una operación no tripulada en Chile funciona razonablemente bien en su primer tramo. El operador se registra, la aeronave se inscribe en el registro nacional, el piloto obtiene su credencial y, cuando la operación lo requiere, se solicita una autorización a través de los canales de la autoridad. El expediente se tramita y se resuelve en plazos que, comparados con la región, son competitivos.

El problema aparece después. Lo que la autorización entrega es un **sobre operacional**: un rango de fechas, un conjunto de pilotos habilitados, un listado de aeronaves y un área geográfica descrita en un documento. A partir de ese momento, el Estado deja de saber. No sabe si el vuelo se realizó, ni cuándo, ni con qué aeronave de las autorizadas, ni si el perfil ejecutado corresponde al declarado, ni si hubo desviación, ni si hubo un incidente que no fue reportado. La trazabilidad operacional aguas abajo del permiso, sencillamente, no existe en formato digital verificable.

- **No hay imagen en tiempo real.** Dos operadores autorizados pueden estar volando en el mismo volumen sin que ninguno de los dos, ni la autoridad, lo sepa.
- **No hay verificación de conformidad.** Nada compara automáticamente la posición real de la aeronave con el volumen que se le autorizó.
- **No hay reconstrucción de eventos.** Ante un incidente, la investigación depende de la bitácora que el propio operador presente, en el formato que decida y con la integridad que garantice.
- **No hay fiscalización de la operación ilegal.** El vuelo de quien nunca pidió permiso y el de quien lo tiene son igualmente invisibles, lo que castiga al operador formal.
- **No hay dato para regular.** Sin registro de operaciones no se puede dimensionar la demanda, medir el riesgo real ni calibrar una norma futura sobre evidencia.

EL DIAGNÓSTICO EN UNA FRASE

El Estado gestiona con solvencia **el expediente**. Lo que le falta es un sistema que gestione **el tránsito**. Son dos funciones distintas, y la segunda no se obtiene mejorando la primera: se obtiene construyendo la capa digital que hoy no existe entre el permiso y el vuelo.

Esta es la razón de ser de CÓNDOR UTM y el eje doctrinario de todo el programa: **no reemplazar el sistema de autorizaciones de la autoridad, sino completarlo aguas abajo.**

Hay una consecuencia de este punto ciego que se discute poco y que es, probablemente, la más grave. Mientras no exista registro digital confiable del hecho aeronáutico no tripulado, **cualquier norma que se dicte será una norma sin**

retroalimentación. La autoridad fijará límites de peso, de altura y de distancia basándose en el estado del arte internacional y en el criterio profesional de sus equipos, que es lo correcto en ausencia de datos, pero no podrá verificar si esos límites están calibrados para la realidad operacional chilena, ni ajustarlos cuando dejen de estarlo. La regulación basada en evidencia requiere, primero, que exista evidencia.



FIGURA 03 Cadena administrativa y brecha de trazabilidad entre autorización y vuelo real.

Chile en cifras: el cielo que hay que digitalizar

Digitalizar el espacio aéreo de baja cota no es una metáfora. Es un trabajo concreto de estructuración de datos: convertir texto de publicaciones aeronáuticas, cartografía y fuentes abiertas en geometrías consultables por una máquina en milisegundos. Esto es lo que ese trabajo ha producido hasta hoy para el territorio chileno.

Las cifras que siguen corresponden al conjunto de datos operativo de CÓNDOR UTM a la fecha de cierre de esta edición. No son estimaciones: son el recuento de las geometrías efectivamente cargadas, validadas y servidas por el motor de geo-conciencia del sistema. Se publican porque la conversación sobre UTM en la región tiende a quedarse en el plano conceptual, y porque el primer indicador de madurez de una plataforma es cuánto espacio aéreo tiene realmente estructurado.

TABLA 1.2 – ESPACIO AÉREO CHILENO ESTRUCTURADO EN CÓNDOR UTM

CAPA DE DATOS	VOLUMEN	COMPOSICIÓN	LINAJE
Zonas UAS (geo-zonas)	145	112 restringidas · 20 peligrosas · 13 prohibidas	Publicación de información aeronáutica
Volúmenes ATZ / CTR	40	21 zonas de control · 19 zonas de tránsito de aeródromo	AIP ENR 4.1
Regiones de información de vuelo	5	Antofagasta, Santiago, Puerto Montt, Punta Arenas, Isla de Pascua	AIP
Aeródromos y aeropuertos	35	8 de gran porte · 25 de porte medio · 2 de porte menor	Base aeronáutica pública
Sitios sensibles	316	149 recintos penales · 139 helipuertos · 28 instalaciones militares	AIP y cartografía abierta
Áreas silvestres protegidas	Cobertura nacional	Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado	Organismo forestal del Estado
Malla de techos operacionales	4.192 celdas	Seis tramos: 0 · 15 · 45 · 75 · 105 · 120 metros sobre el terreno	Modelo propio sobre restricciones publicadas

Fuente: base de datos operativa CÓNDOR UTM, recuento a septiembre de 2026. Las geometrías derivadas de publicaciones aeronáuticas conservan su linaje declarado por elemento.

La última fila merece explicación porque es la menos evidente y la más útil. Una geo-zona clásica responde a la pregunta binaria «¿puedo volar aquí?». La malla de techos responde a una pregunta operacionalmente más rica: «¿hasta qué altura puedo volar aquí?». Esa diferencia es la que separa una prohibición de una habilitación. El territorio se descompone en celdas y a cada celda se le asigna el techo máximo compatible con las restricciones que la afectan. Sobre 1.279 celdas el techo resultante es cero —son las superficies donde no se puede operar sin coordinación específica—, mientras que en 999 celdas el techo llega a los ciento

veinte metros completos y en las restantes 1.914 el techo queda escalonado en quince, cuarenta y cinco, setenta y cinco o ciento cinco metros según la superficie limitadora que las afecta.

Traducido a la operación real: un operador que planifica un levantamiento fotogramétrico en las cercanías de un aeródromo no recibe un «no» genérico ni un «sí» temerario, sino la cota exacta que puede usar en cada porción de su área de trabajo. Esa es la diferencia entre una restricción y un servicio, y es, en pocas palabras, todo el valor que el UTM le entrega al operador antes incluso de que despegue.

Un mapa que solo prohíbe es una barrera. Un mapa que dice hasta qué altura se puede volar es una habilitación.

—Capítulo 01 · Cierre

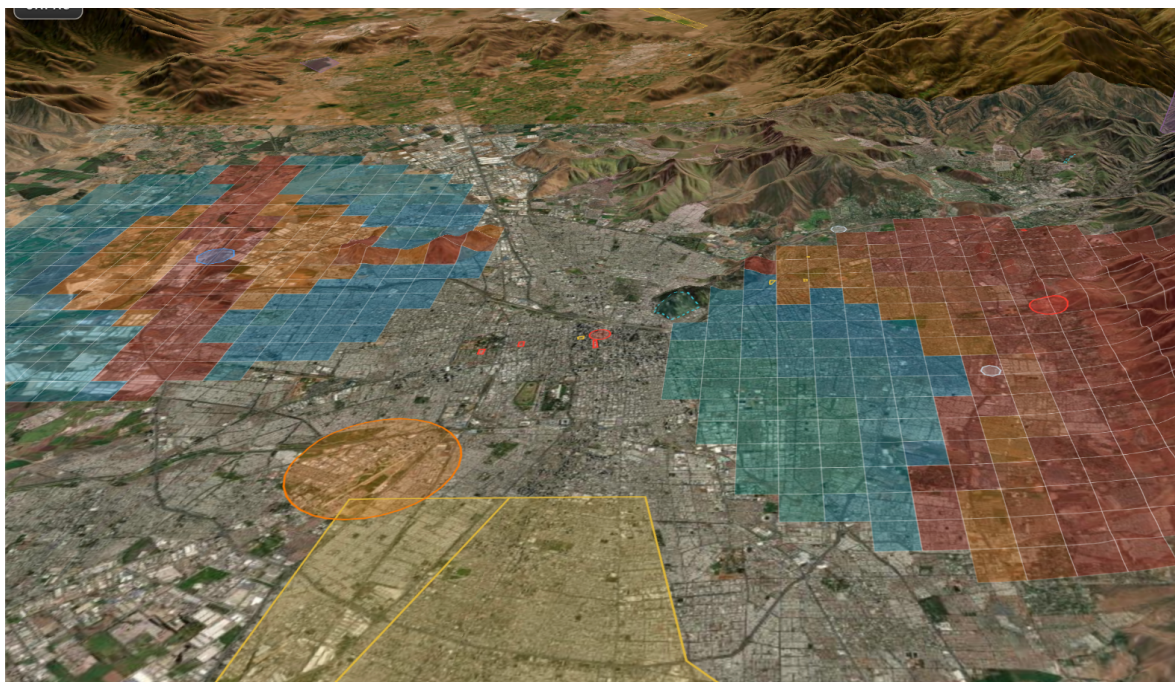


FIGURA 04 Captura operativa de CÓNDOR: malla de techos operacionales sobre el territorio.

ADVERTENCIA METODOLÓGICA

Las geometrías derivadas de descripciones textuales de publicaciones aeronáuticas —círculos de radio declarado, por ejemplo— son **representaciones digitales de un texto normativo, no el texto normativo mismo**. En caso de discrepancia entre la geometría del sistema y la publicación oficial, prevalece la publicación.

El linaje de cada elemento se conserva como atributo del dato precisamente para permitir esa verificación. Un sistema UTM que no puede decir de dónde salió cada polígono no es auditable.

02

CAPÍTULO DOS

Qué es realmente el UTM



Antes de discutir cómo se implementa conviene fijar qué es. Este capítulo reconstruye la definición desde la fuente y aclara los tres equívocos que más daño hacen en la discusión regional.

- La definición de OACI y el marco común
- Los servicios U-space y el reglamento europeo
- Actores y roles: quién presta qué
- El andamiaje de estándares que lo sostiene



CAPÍTULO 02 · SECCIÓN 2.1

La definición de OACI

La Organización de Aviación Civil Internacional no dictó una norma de UTM. Hizo algo distinto y, para el momento, más inteligente: publicó un marco común que describe qué debe existir, deja a cada Estado decidir cómo lo implementa y evita que el mundo se fragmente en arquitecturas incompatibles.

El documento de referencia es el marco común de UTM de OACI, cuya cuarta edición constituye hoy la base conceptual sobre la que trabajan la mayoría de las autoridades. Su premisa es sencilla: el tránsito no tripulado de baja cota requiere un conjunto de servicios que no son control de tránsito aéreo, que deben ser interoperables entre Estados y que pueden ser prestados por entidades distintas de la autoridad, bajo su supervisión.

De esa premisa se desprenden tres definiciones que se utilizan de manera consistente en el resto de esta edición.

LAS TRES DEFINICIONES CANÓNICAS

UTM. Sistema específico de gestión del tránsito de aeronaves no tripuladas que integra el espacio aéreo de baja cota mediante servicios digitales, sin formar parte del servicio de control de tránsito aéreo y sin sustituirlo.

Servicio UTM. Función discreta y delimitada que el sistema presta a un usuario identificable — identificación en red, geo-conciencia, autorización de vuelo, información de tránsito, meteorología, monitoreo de conformidad— y de la que alguien responde.

Proveedor de servicios. Entidad que presta uno o más servicios UTM. Puede ser la autoridad, puede ser una entidad privada supervisada, y en la mayoría de los modelos maduros hay varios coexistiendo y federados entre sí.

La primera definición fija un límite institucional: **«sin sustituirlo»**. El marco de OACI es explícito en que el UTM no absorbe ni reemplaza el control de tránsito aéreo: convive con él y se interconecta con él en los volúmenes donde ambos dominios se tocan, típicamente el entorno de aeródromo y el espacio aéreo controlado de baja cota. Esta precisión, que a veces se lee como una obviedad diplomática, es en realidad la definición del perímetro institucional del problema y el fundamento de todo modelo híbrido.

La segunda pone el acento en la responsabilidad: **«de la que alguien responde»**. El UTM no es una plataforma tecnológica genérica: es un conjunto de servicios con un responsable identificable por cada uno. Esta es la diferencia entre un producto de software y un proveedor de servicios aeronáuticos, y es la razón por la que la discusión de UTM desemboca siempre, tarde o temprano, en una discusión de certificación y de responsabilidad.

CAPÍTULO 02 · SECCIÓN 2.2

Los servicios U-space

Europa tomó el marco conceptual de OACI y lo convirtió en derecho vigente. El reglamento de ejecución de la Unión Europea que establece U-space define un conjunto de servicios obligatorios y otros condicionales, fija quién los presta y bajo qué condiciones, y es hoy el texto más citado del mundo cuando una autoridad diseña su propio esquema.

El diseño europeo parte de una idea que vale la pena explicitar porque suele malinterpretarse: **U-space no es un espacio aéreo, es un conjunto de servicios prestados dentro de un volumen que la autoridad designa como tal**. Un Estado no «tiene U-space» por comprar una plataforma; lo tiene cuando designa volúmenes, evalúa el riesgo del espacio aéreo designado, certifica a los proveedores y exige que toda operación dentro de ese volumen use los servicios definidos.

TABLA 2.1 — LOS SERVICIOS DEL MARCO EUROPEO Y SU FUNCIÓN OPERACIONAL

SERVICIO	CARÁCTER	QUÉ RESUELVE EN LA OPERACIÓN
Identificación en red	Obligatorio	Que la autoridad y los demás actores sepan qué aeronave está volando, de quién es y dónde está su piloto, sin depender de que alguien lo declare a posteriori.
Geo-conciencia	Obligatorio	Que el operador conozca, antes y durante el vuelo, las zonas y restricciones aplicables a su volumen de operación y a la altura que pretende usar.
Autorización de vuelo UAS	Obligatorio	Que la intención de operación se contraste automáticamente con las de los demás operadores y con las restricciones vigentes, y se resuelva el conflicto antes del despegue.
Información de tránsito	Obligatorio	Que el operador reciba alerta oportuna de otro tránsito — tripulado o no— que pueda afectar su operación en curso.
Información meteorológica	Condicional	Que las condiciones que exceden los límites de la aeronave bloqueen o condicionen la activación del vuelo, en lugar de descubrirse en el aire.
Monitoreo de conformidad	Condicional	Que el sistema compare de forma continua la posición real con el volumen autorizado y declare desviación cuando se produce.

Elaboración propia a partir del Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664 y sus medios aceptables de cumplimiento. Los servicios condicionales se exigen en función del riesgo del espacio aéreo designado.

El conjunto sigue una lógica operacional clara. Los tres primeros servicios construyen el estado del sistema antes del vuelo: quién eres, dónde puedes volar, qué se te autorizó. El cuarto y el sexto lo verifican durante el vuelo: qué más hay cerca de ti, y estás cumpliendo lo que declaraste. El quinto introduce la única variable física que puede invalidar una autorización correcta. Ninguno de los seis requiere que una persona emita instrucciones a un piloto.

El U-space no le dice al piloto qué hacer. Le dice qué puede hacer, y después verifica que lo haya hecho.

—Capítulo 02

Hay un séptimo elemento que el reglamento europeo trata por separado y que en la práctica resulta ser la pieza estructural del sistema: el **servicio de información común**. No es un servicio prestado al operador, sino la fuente única y autoritativa de los datos que todos los proveedores deben compartir —la designación de los volúmenes, las restricciones vigentes, la información aeronáutica aplicable, la meteorología y la lista de operaciones autorizadas—. Sin esa fuente común, dos proveedores pueden autorizar operaciones incompatibles porque cada uno mira su propio mundo. Con ella, la interoperabilidad deja de ser una aspiración y pasa a ser una consecuencia arquitectónica.



FIGURA 05 Esquema conceptual de los servicios U-space y su secuencia operacional.

Actores y roles: quién presta qué

La confusión de roles es el error más frecuente en la discusión latinoamericana de UTM, y no es inocuo: de él se derivan expectativas regulatorias imposibles y propuestas comerciales que la autoridad no puede aceptar aunque quiera.

El ecosistema tiene cinco roles bien diferenciados. Una misma organización puede ocupar más de uno, pero las funciones no se confunden y las responsabilidades tampoco.

TABLA 2.2 – LOS CINCO ROLES DEL ECOSISTEMA UTM

ROL	FUNCIÓN	RESPONDE POR
Autoridad aeronáutica	Designa los volúmenes, fija las reglas, certifica y supervisa a los proveedores, conserva la facultad de control de tránsito aéreo.	La seguridad del sistema en su conjunto y la legalidad de la habilitación.
Proveedor de servicios U-space (USSP)	Presta los servicios definidos a los operadores: autorización, geo-conciencia, identificación, conformidad.	La correcta prestación de cada servicio que tiene habilitado.
Proveedor de información común (CISP)	Publica la fuente única y autoritativa de datos comunes a todos los proveedores.	La integridad, oportunidad y disponibilidad del dato común.
Proveedor de datos suplementarios (SDSP)	Aporta datos especializados: meteorología, terreno, obstáculos, población, cobertura de enlace.	La calidad y trazabilidad del dato que entrega.
Operador UAS	Planifica, declara y ejecuta la operación con la aeronave y la tripulación que corresponde.	El cumplimiento de la operación autorizada y de la normativa aplicable.

Ecosistema UTM y circulación de responsabilidad

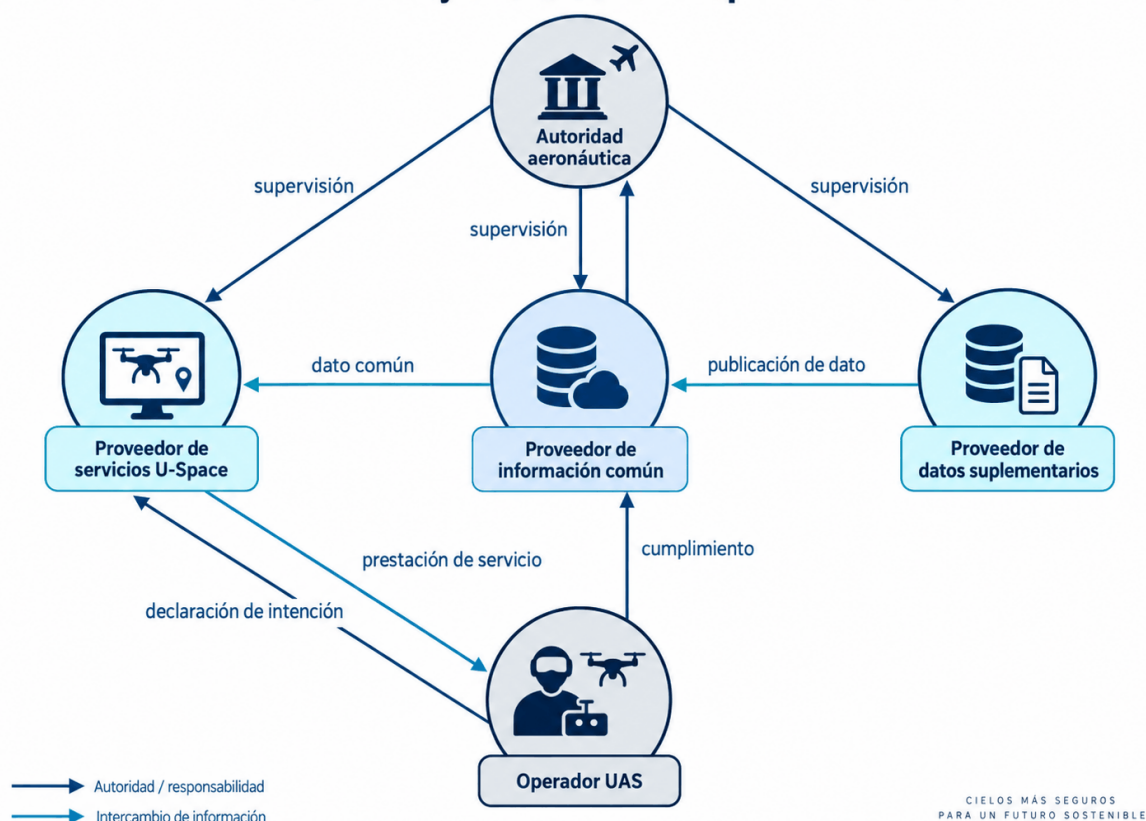


FIGURA 06 Esquema de actores del ecosistema UTM y circulación de responsabilidades.

Tres equívocos que deben despejarse

Primero: «el UTM es un control de tránsito aéreo para drones». Ya se argumentó en el capítulo anterior; se repite aquí porque es el equívoco que más recursos ha costado en la región. El UTM no emite instrucciones de separación a pilotos. Autoriza volúmenes, informa y verifica.

Segundo: «un proveedor de servicios sustituye a la autoridad». No. El proveedor presta servicios que la autoridad define, en volúmenes que la autoridad designa, bajo condiciones que la autoridad certifica y con supervisión que la autoridad ejerce. La analogía correcta no es la de un regulador privatizado, sino la de un proveedor de servicios de navegación aérea: presta un servicio esencial bajo un régimen de habilitación estricto, y la autoridad puede revocarlo.

Tercero: «con un proveedor basta». Es el equívoco más sutil y el que más condiciona el diseño institucional. Un modelo de proveedor único es operativamente más simple y estratégicamente más frágil: concentra el riesgo, elimina la presión competitiva sobre la calidad del servicio y crea una dependencia que ninguna autoridad debería aceptar de buen grado. Los marcos maduros —el europeo por reglamento y el estadounidense por práctica industrial— son multiproveedor por diseño, y resuelven la coordinación entre proveedores mediante un servicio de descubrimiento y sincronización que permite que cada uno sepa qué operaciones han declarado los demás sin compartir sus bases de datos.

LA CONSECUENCIA PARA CHILE

Cualquier esquema que se proponga a la autoridad chilena debe nacer **multiproveedor por diseño**, aunque al principio exista un solo proveedor operando. Diseñar para uno y adaptar después a varios es, en términos de arquitectura, rehacer el sistema.

La forma de demostrarlo no es declarativa sino técnica: adoptar desde el inicio los estándares de interoperabilidad entre proveedores y el servicio de descubrimiento y sincronización que los soporta.

CAPÍTULO 02 · SECCIÓN 2.4

El andamiaje de estándares

Bajo la superficie regulatoria hay una capa de estándares técnicos de consenso que hace posible que dos sistemas contruidos por equipos distintos, en países distintos, se entiendan. Esta es la capa que decide si un programa nacional será interoperable o será una isla.

Para ordenar el análisis, se distinguen tres familias que cumplen funciones diferentes y suelen confundirse.

TABLA 2.3 — EL ANDAMIAJE TÉCNICO DEL UTM

INSTRUMENTO	FAMILIA	QUÉ NORMALIZA
Marco común UTM de OACI	Marco conceptual	Qué es el UTM, qué servicios lo componen, cómo se relaciona con el ATM. No es vinculante; orienta a los Estados.
Reglamento (UE) 2021/664	Derecho vigente	En la Unión Europea: servicios obligatorios, designación de volúmenes, certificación de proveedores, servicio de información común.
ASTM F3411	Estándar de consenso	La identificación remota: qué mensajes difunde una aeronave no tripulada, en qué formato y por qué medio físico.
ASTM F3548	Estándar de consenso	La interoperabilidad entre proveedores: intención operacional, coordinación estratégica, restricciones y estado de conformidad.
InterUSS / DSS	Implementación de referencia	El servicio de descubrimiento y sincronización que permite a varios proveedores federarse sin compartir bases de datos.
ISO 23629	Estándar internacional	Terminología, requisitos de servicio y arquitectura de sistemas UTM.
SORA (JARUS)	Metodología	La evaluación de riesgo de operaciones específicas: riesgo terrestre, riesgo aéreo y nivel de garantía exigible.

La pieza que más suele subestimarse es la penúltima. El estándar de interoperabilidad entre proveedores no describe una función de cara al usuario: describe un contrato entre máquinas. Define qué es una **intención operacional** — el volumen en cuatro dimensiones que un operador declara—, cómo se publica, cómo se descubre la intención ajena, cómo se detecta el solapamiento y cómo se comunica el estado de conformidad. Es el equivalente funcional, en el mundo no tripulado, de lo que los formatos de intercambio de datos de vigilancia representaron para la interconexión de centros de control.

Adoptar ese contrato desde el primer día tiene un costo de diseño y un beneficio estratégico desproporcionado: convierte a un sistema nacional en un nodo de una red internacional, y convierte la pregunta regulatoria «¿cómo certificamos a este proveedor?» en una pregunta mucho más tratable, que es «¿cumple el proveedor los mismos criterios de desempeño que ya están funcionando en otros Estados?».

Un sistema UTM que no habla el estándar de interoperabilidad no es un sistema UTM. Es una base de datos con mapa.

—Capítulo 02 · Cierre

La última pieza del andamiaje —la metodología de evaluación de riesgo de operaciones específicas— merece capítulo aparte y lo tendrá. Basta anticipar aquí que su versión 2.5 introdujo cambios sustantivos en el cálculo del riesgo terrestre y que su valor real, dentro de un sistema UTM, no está en el documento sino en la automatización: mientras el análisis de riesgo siga siendo un ejercicio manual que un consultor entrega en formato de informe, será un trámite. Cuando se convierte en una función que el sistema evalúa sobre la geometría declarada y los datos de población reales, se convierte en un servicio.

CAPÍTULO 02 · ANEXO

Cronología: cómo se construyó el consenso

El UTM no apareció de golpe. Es el resultado de una década de decisiones encadenadas en las que cada actor resolvió un pedazo del problema y el resto lo adoptó. Conocer la secuencia ayuda a entender por qué el marco actual tiene la forma que tiene.

TABLA 2.4 – HITOS DE LA CONSTRUCCIÓN DEL MARCO INTERNACIONAL

PERIODO	HITO	QUÉ QUEDÓ ESTABLECIDO
2015 – 2017	Primeros programas de investigación sobre gestión de tránsito no tripulado y publicación de los primeros conceptos de operación.	La idea de que el tránsito no tripulado de baja cota requiere un sistema propio, distinto del control de tránsito aéreo.
2017 – 2019	Europa formula el concepto de U-space por fases y define el primer catálogo de servicios.	Una hoja de ruta por niveles de servicio, del registro básico a la integración plena.
2019 – 2020	Publicación de los primeros estándares de consenso sobre identificación remota.	Un formato común de identificación: cualquier receptor puede leer cualquier aeronave conforme.
2019 – 2021	Reglamentación europea sobre aeronaves no tripuladas y sus operaciones; categorías abierta, específica y certificada.	La clasificación por riesgo de la operación en lugar de por tipo de aeronave.
2021	Reglamento de ejecución que establece el marco regulador del U-space en la Unión Europea.	La figura jurídica del proveedor de servicios, el servicio de información común y la designación de volúmenes.
2021 – 2023	Publicación de los estándares de interoperabilidad entre proveedores y de la implementación de referencia del servicio de descubrimiento y sincronización.	El contrato máquina a máquina que permite que varios proveedores coexistan sin fusionar bases de datos.
2022 – 2024	Sucesivas ediciones del marco común de gestión de tránsito no tripulado de la organización internacional de aviación civil; revisión de la metodología de evaluación de riesgo.	Armonización global del vocabulario y de los principios, sin imponer una arquitectura única.
2024 – 2025	Primeros ecosistemas multiproveedor en producción sobre espacio aéreo compartido, con aceptación de la autoridad por desempeño.	La demostración empírica de que el modelo funciona sin necesidad de una certificación específica previa.
2025 – 2026	Maduración regulatoria de las operaciones más allá de la línea visual directa en los principales mercados y adopción progresiva de la identificación remota como requisito.	El paso de la excepción autorizada caso a caso a la operación rutinaria bajo reglas generales.

Síntesis editorial elaborada a partir de la documentación pública de los organismos citados en el aparato de referencia. Los periodos son indicativos y se solapan.

Dos lecturas de esta secuencia interesan especialmente a un país que llega ahora. La primera es que **el orden se repite en todas las jurisdicciones**: primero identificación, después registro digital, después autorización automatizada, y solo entonces operación rutinaria más allá de la línea visual. Nadie saltó escalones y quienes lo intentaron retrocedieron.

La segunda es más alentadora: **llegar tarde tiene ventajas reales**. Un país que empieza hoy no necesita financiar la investigación básica, no necesita inventar el formato de identificación ni el contrato de interoperabilidad, y puede adoptar un marco regulatorio ya probado en dos jurisdicciones grandes. El costo de entrada bajó de manera drástica en cinco años. Lo que no bajó —y no bajará— es el costo de la decisión institucional de empezar.



FIGURA 07 Cronología sintética de la construcción del marco internacional.

03

CAPÍTULO TRES

La Operación 4D



Todo sistema UTM que funciona gira en torno a un solo objeto de datos. Si ese objeto está bien diseñado, los servicios se ordenan solos alrededor de él.

- El objeto que ordena todo el sistema
- Ciclo de vida en ocho pasos
- Deconflicción estratégica
- Conformidad en vivo y evaluación de riesgo



El objeto que ordena el sistema

En el control de tránsito aéreo convencional, el objeto central es la traza: una posición que se actualiza, se correlaciona con un plan de vuelo y se presenta al controlador. En el UTM el objeto central es otro, y es anterior al vuelo. Es la intención declarada: qué volumen de espacio pretende ocupar un operador, durante qué ventana de tiempo y para qué.

A ese objeto lo llamamos **Operación 4D**: tres dimensiones de espacio más una de tiempo. No es una ruta, no es un plan de vuelo en el sentido clásico y no es una autorización administrativa. Es una declaración de intención estructurada, verificable por máquina y con estado.

La elección es deliberada y tiene consecuencias profundas. Un plan de vuelo convencional describe una trayectoria: puntos de notificación, niveles, tiempos estimados. Una Operación 4D describe un **volumen**: un polígono en el terreno, una banda de altura sobre él y una ventana temporal. La diferencia importa porque una aeronave no tripulada pequeña rara vez vuela una línea: barre un área, orbita una estructura, sigue un tendido eléctrico con desviaciones constantes. Exigirle una trayectoria es exigirle una ficción; exigirle un volumen es exigirle algo que puede cumplir y que el sistema puede verificar.

ANATOMÍA DE UNA OPERACIÓN 4D

Identidad — identificador único, operador responsable, aeronave (con su identificador de identificación remota) y piloto al mando.

Volumen — polígono de operación sobre el terreno, altura mínima y máxima sobre el terreno.

Tiempo — instante de inicio e instante de término de la ventana declarada.

Propósito y contingencia — naturaleza de la operación y procedimiento previsto ante pérdida de enlace o emergencia.

Riesgo — resultado de la evaluación: clase de riesgo terrestre, clase de riesgo aéreo y nivel de garantía exigible.

Estado — la posición de la operación en su ciclo de vida, que es lo que convierte al objeto en un sistema y no en un formulario.

El campo de estado es el que hace todo el trabajo. Una Operación 4D no es un documento: es una **máquina de estados** que recorre una secuencia definida y en la que cada transición deja registro. Esa secuencia es, literalmente, el flujo de trabajo del UTM.

Ciclo de vida en ocho pasos

Lo que sigue no es un procedimiento propuesto: es la secuencia que implementa CÓNDOR y que corresponde, paso por paso, a los servicios que el marco europeo define como obligatorios y condicionales.

- **1 • Creación.** El operador declara el volumen en cuatro dimensiones desde el portal o desde su propio sistema a través de la interfaz de programación. La operación nace en estado de borrador.
- **2 • Geo-conciencia.** El sistema contrasta el volumen contra las geo-zonas vigentes, las superficies limitadoras de obstáculos, la malla de techos operacionales y las restricciones temporales activas. Devuelve no un veredicto binario sino la lista de elementos afectados y el techo disponible.
- **3 • Deconflicción estratégica.** El volumen se compara en cuatro dimensiones con las operaciones ya autorizadas. El solapamiento se evalúa simultáneamente en espacio y en tiempo: dos operaciones en el mismo polígono a horas distintas no son un conflicto.
- **4 • Evaluación de riesgo.** Sobre la geometría declarada, el sistema calcula el riesgo terrestre a partir de la densidad de población bajo el volumen y el riesgo aéreo a partir de la clase de espacio y el tránsito esperado, y deriva el nivel de garantía exigible.
- **5 • Autorización.** Si no hay conflicto, ni zona afectada, ni excedencia del nivel de riesgo admisible para el perfil del operador, la operación pasa a autorizada de forma automática. Si alguna condición lo requiere, entra en cola para resolución de la autoridad o del mandante.
- **6 • Activación.** En el momento del despegue, el operador activa la operación. Este paso no es un trámite: es una revalidación final contra el estado del mundo en ese instante —zonas que pudieron cambiar, meteorología que pudo deteriorarse, restricciones que pudieron publicarse—. Autorización y despegue no son lo mismo.
- **7 • Monitoreo de conformidad.** Durante el vuelo, el sistema compara la posición reportada por identificación remota con el volumen autorizado. Si la aeronave sale de él —lateral o verticalmente—, la operación se declara no conforme y se genera alerta.
- **8 • Cierre.** Al término, la operación se cierra y queda como registro inmutable: quién voló, dónde, cuándo, con qué autorización y con qué desviaciones. Ese registro es la bitácora automática que hoy no existe.



FIGURA 08 Máquina de estados de la Operación 4D.

Vale la pena detenerse en el paso seis, porque es la diferencia más visible entre un sistema que parece funcionar y uno que resiste una auditoría. En un esquema ingenuo, la autorización habilita el vuelo y con eso basta. En la operación real, entre la autorización y el despegue pueden pasar horas o días, y en ese lapso el mundo cambia: se publica una restricción, se levanta viento por encima de los límites de la aeronave, se activa una zona por un operativo. Una autorización que no se revalida en el momento del despegue es una autorización que puede estar autorizando algo que ya no es seguro.

La autorización dice que podías volar. La activación dice que todavía puedes.

— Capítulo 03

Deconflicción estratégica

Aquí está el corazón operacional del UTM y, a la vez, la función que más se malinterpreta. Deconflicción estratégica no significa evitar colisiones en vuelo. Significa impedir que dos operadores planifiquen el mismo espacio a la misma hora, de modo que la colisión nunca llegue a ser un escenario posible.

La detección del conflicto es geoméricamente sencilla y computacionalmente exigente: hay que verificar si dos volúmenes prismáticos se intersectan en el espacio y si sus ventanas temporales se solapan. Ambas condiciones deben cumplirse. Si se cumplen, hay conflicto estratégico; si solo se cumple una, no lo hay. Lo que complica el problema no es la geometría sino la escala: cada nueva operación debe compararse contra todas las operaciones autorizadas vigentes en el entorno, y la respuesta debe llegar en el tiempo que un usuario tolera esperar frente a un formulario.

Detectar no basta: hay que resolver

Un sistema que solo detecta el conflicto y devuelve un rechazo traslada el problema al operador, que tendrá que adivinar qué cambiar. Un sistema maduro **propone la resolución**, y lo hace en un orden que refleja el costo operacional de cada alternativa.

TABLA 3.1 – JERARQUÍA DE RESOLUCIÓN DE CONFLICTO ESTRATÉGICO

ORDEN	ESTRATEGIA	QUÉ SE MODIFICA	COSTO PARA EL OPERADOR
1	Ventana temporal	Se adelanta o retrasa la operación hasta que las ventanas no se solapan.	Bajo. La misión se ejecuta igual, más tarde o más temprano.
2	Banda de altura	Se ajusta la altura mínima o máxima para separar verticalmente los volúmenes.	Medio. Puede afectar la calidad del producto aéreo obtenido.
3	Geometría del volumen	Se recorta o desplaza el polígono para eliminar la intersección.	Alto. Puede dejar parte del área de trabajo sin cubrir.
4	Escalamiento	No hay resolución automática; la decisión pasa a la autoridad o al mandante del espacio.	Variable. Introduce latencia humana en el proceso.

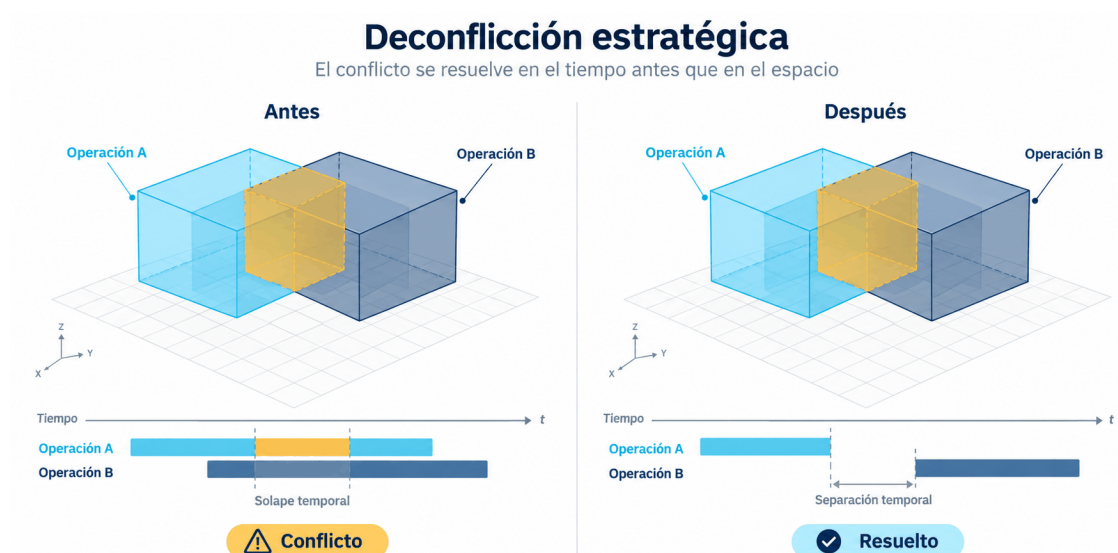


FIGURA 09 Ejemplo conceptual de deconflicción estratégica mediante separación temporal.

El criterio de prioridad entre operaciones en conflicto es una decisión de política pública, no una decisión de ingeniería. El criterio más simple y más defendible en una fase inicial es el de **prioridad por orden de declaración**: quien declaró primero conserva su volumen, y quien llega después se ajusta. Es transparente, no discrimina y no requiere que nadie juzgue la importancia relativa de dos misiones.

Ese criterio, sin embargo, no puede ser el único en régimen. Un vuelo de búsqueda y salvamento, una evacuación médica o una operación de respuesta a emergencia no pueden quedar subordinados a un levantamiento fotogramétrico que se declaró primero. Los marcos maduros introducen niveles de prioridad —desde la operación de emergencia del Estado hasta la operación recreativa— y definen qué operaciones pueden desplazar a cuáles. Fijar esos niveles es una atribución de la autoridad y debe quedar en la norma, no en la configuración de un proveedor.

RECOMENDACIÓN TÉCNICA VS. EXIGENCIA NORMATIVA

Recomendación técnica. Implementar desde el inicio una jerarquía de resolución automática con prioridad por orden de declaración, y dejar el escalamiento a la autoridad como último recurso.

Exigencia normativa pendiente. La definición de los niveles de prioridad entre operaciones y de las reglas de desplazamiento es una decisión nacional que ninguna norma chilena ha adoptado todavía. Hasta que exista, cualquier esquema de prioridades que implemente un proveedor es una propuesta, no una regla.

CAPÍTULO 03 · SECCIÓN 3.4

Conformidad en vivo

Si la deconflicción estratégica es el corazón, el monitoreo de conformidad es el nervio. Es la función que convierte una autorización en papel en una autorización verificada, y es la que más se echa de menos cuando hay que reconstruir un incidente.

El principio es directo: el sistema conoce el volumen autorizado, recibe la posición reportada por la aeronave y compara una cosa con la otra de forma continua. Si la posición está dentro, la operación es conforme. Si sale, deja de serlo. Lo que convierte ese principio en un servicio utilizable son los detalles: qué margen de tolerancia se admite, en qué plazo se declara la desviación, qué ocurre cuando se pierde el dato y quién recibe la alerta.

TABLA 3.2 – ESTADOS DE CONFORMIDAD Y SU TRATAMIENTO

ESTADO	CONDICIÓN	TRATAMIENTO
Conforme	La posición reportada está dentro del volumen autorizado y el dato es reciente.	Operación normal. Registro continuo.
En observación	La posición se aproxima al borde del volumen o el dato ha envejecido más allá del umbral.	Aviso al operador. Sin escalamiento. Permite corrección temprana.
No conforme	La posición está fuera del volumen autorizado, lateral o verticalmente.	Alerta al operador y a la supervisión. Se marca la operación y se registra el evento.
Dato perdido	No se recibe posición durante un intervalo superior al umbral definido.	La traza entra en extrapolación y luego se declara perdida. No equivale a conformidad.
Contingencia	El operador declara una situación anómala o el sistema detecta pérdida de enlace de mando.	Activación del procedimiento declarado en la operación. Notificación prioritaria.

El estado de dato perdido merece énfasis porque encierra el error conceptual más peligroso de todo el capítulo: **la ausencia de evidencia de desviación no es evidencia de conformidad**. Un sistema que declara «conforme» simplemente porque no ha recibido una posición fuera del volumen está mintiendo por omisión. Cuando el dato desaparece, el sistema debe decirlo con esa palabra, y el registro debe conservar el intervalo sin cobertura.

Los umbrales —cuánta desviación lateral y vertical se tolera, cuántos segundos de silencio antes de declarar pérdida— no deberían ser una configuración global del sistema. Deberían ser **atributos de cada autorización**, fijados en función del perfil de riesgo de esa operación concreta. Una operación sobre zona despoblada con una aeronave de dos kilos admite una tolerancia que sería inaceptable en una operación sobre área urbana con una aeronave de veinte. Escribir esos umbrales en la autorización es lo que permite, después, auditar si la desviación fue relevante.

SORA: de trámite a cálculo

La metodología de evaluación de riesgo de operaciones específicas es, probablemente, el aporte metodológico más importante de la última década en aviación no tripulada. También es, en la práctica cotidiana de la región, uno de los principales cuellos de botella. La razón es que se sigue ejecutando a mano.

La lógica de la metodología es sólida y vale la pena resumirla sin jerga. Toda operación tiene dos riesgos independientes: el que representa para las personas en tierra si la aeronave cae, y el que representa para otras aeronaves si se produce un encuentro en el aire. El primero depende fundamentalmente de dos variables: el tamaño de la aeronave —que determina la energía del impacto— y la densidad de población bajo la trayectoria. El segundo depende de la clase de espacio aéreo y del tránsito esperado en él. De la combinación de ambos se deriva un nivel de garantía exigible, y ese nivel determina qué tan robusto debe ser el conjunto de medidas técnicas y operacionales que el operador debe demostrar.

El problema no está en el método sino en su ejecución. Hoy, en la mayor parte de la región, el análisis se realiza a mano: alguien estima la densidad de población consultando fuentes dispersas, aplica tablas, redacta un informe y lo adjunta al expediente. El proceso toma días, es difícil de auditar, es imposible de reproducir exactamente y produce resultados que varían según quién lo hizo.

Mientras el análisis de riesgo sea un informe que alguien redacta, será un trámite. Cuando sea una función que el sistema evalúa, será un servicio.

— Capítulo 03 · Cierre

La automatización cambia la naturaleza del ejercicio. Si el sistema conoce el polígono declarado, si tiene cargada una malla de densidad de población y si conoce las características de la aeronave inscrita, el riesgo terrestre intrínseco se calcula sobre la geometría real, no sobre una estimación. Si además conoce la clase de espacio aéreo del volumen y las zonas que lo afectan, el riesgo aéreo se deriva del mismo dato. El resultado deja de ser un informe y pasa a ser un atributo de la Operación 4D: calculado, reproducible, versionado y consultable.

Esto tiene un efecto secundario que interesa especialmente a la autoridad: **hace posible la verificación a posteriori**. Un análisis de riesgo automatizado sobre datos versionados puede reejecutarse tal como estaba el día de la autorización. Un informe en formato de documento, no. La diferencia entre ambos es la diferencia entre un sistema auditable y uno que pide confianza.

LA VERSIÓN IMPORTA

La versión 2.5 de la metodología introdujo modificaciones sustantivas en el cálculo del riesgo terrestre y en el tratamiento del área de operación y sus zonas adyacentes. Un sistema que automatiza la evaluación debe declarar **qué versión implementa** y conservar ese dato en cada autorización.

Una evaluación de riesgo sin versión declarada no es verificable, porque no se sabe contra qué reglas fue calculada.

04

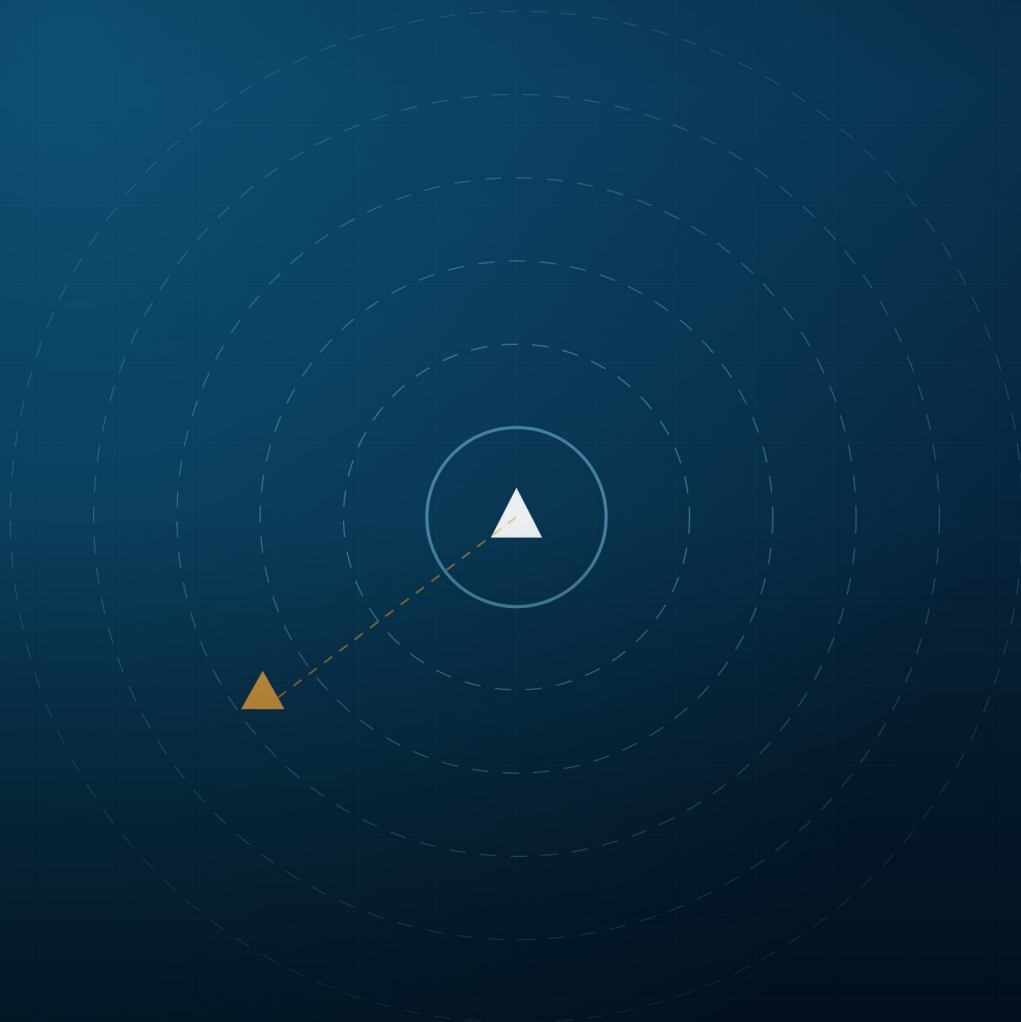
CAPÍTULO CUATRO

La matrícula electrónica



Sin identificación no hay sistema. La identificación remota convierte a una aeronave no tripulada de objeto anónimo en tránsito identificable, y es la condición previa de todo lo demás.

- Qué difunde realmente un dron
- Difusión local y difusión en red
- La red de sensores terrestres
- Del identificador a la traza



CAPÍTULO 04 · SECCIÓN 4.1

Qué difunde realmente un dron

La identificación remota es a la aeronave no tripulada lo que la matrícula al automóvil, con una diferencia decisiva: no hay que estar cerca para leerla, y no hay que pedirle permiso a nadie para hacerlo. Es una difusión abierta, en radiofrecuencia, que cualquier receptor en el alcance puede recibir sin conexión a internet y sin intervenir ningún enlace.

El estándar de consenso que la define especifica un conjunto reducido de mensajes. Esos mensajes delimitan lo que un sistema UTM puede conocer de una aeronave en vuelo.

TABLA 4.1 — MENSAJES DE IDENTIFICACIÓN REMOTA Y SU USO OPERACIONAL

MENSAJE	CONTENIDO	QUÉ HABILITA
Identificación básica	Identificador de la aeronave y tipo de identificador: número de serie del fabricante, matrícula asignada por la autoridad o identificador asignado por el proveedor de servicios.	Correlacionar la aeronave en vuelo con el registro nacional y con la autorización vigente.
Posición y vector	Latitud, longitud, altitud geodésica, altura sobre el terreno, velocidad, rumbo y estado del vuelo.	Construir la traza, verificar conformidad y presentar el tránsito en la consola.
Identificación del operador	Identificador de registro del operador responsable.	Atribuir la operación a un responsable identificable. Es la base de la fiscalización.
Sistema	Ubicación del piloto o de la estación de control y descripción del área de operación.	Localizar al responsable en tierra. Es la información de mayor valor para la fiscalización en terreno.
Autoidentificación	Descripción libre del propósito de la operación.	Contexto para el supervisor. Uso discrecional del operador.

El cuarto mensaje es el que transforma la fiscalización. Saber que hay una aeronave no autorizada sobrevolando un recinto sensible es útil; saber además en qué punto exacto está el piloto que la comanda es lo que convierte esa información en una intervención posible. Ningún sistema de vigilancia aeronáutica convencional entrega ese dato, porque en la aviación tripulada el piloto va a bordo.

UN PUNTO JURÍDICO QUE CONVIENE DEJAR CLARO

Recibir identificación remota es una operación **estrictamente pasiva**: el receptor escucha una difusión abierta que la aeronave emite por diseño y por obligación normativa, y no transmite nada ni accede a ningún enlace privado.

No hay interceptación de comunicaciones, no hay acceso a sistemas ajenos y no hay tratamiento de comunicación privada. La difusión de identificación remota es, por construcción, información pública destinada a ser leída por terceros.

Esta distinción es relevante para el diseño del concepto de operaciones de cualquier red de sensores y debe quedar explícita ante la autoridad aeronáutica y ante la autoridad de telecomunicaciones.

CAPÍTULO 04 · SECCIÓN 4.2

Difusión local y difusión en red

Existen dos formas de que la posición de una aeronave no tripulada llegue al sistema, y no compiten entre sí: se complementan y cubren fallas distintas.

La **difusión local** es la radiodifusión directa desde la aeronave, por Bluetooth o por WiFi, que un receptor en tierra capta dentro de su alcance. Su virtud es la independencia: funciona sin cobertura celular, sin internet y sin que ningún proveedor intermedio esté operativo. Su límite es el alcance, que obliga a desplegar sensores donde se quiere ver.

La **difusión en red** es la publicación de la posición por parte del proveedor de servicios a través de internet, alimentada por el propio equipo de la aeronave o por la aplicación del operador. Su virtud es la cobertura: no requiere sensores en tierra y alcanza todo el territorio donde haya conectividad. Su límite es la dependencia: si cae el enlace de datos o el proveedor, la aeronave desaparece del sistema aunque siga volando.

Un sistema serio ingiere ambas por la misma ruta y las trata como fuentes distintas de un mismo objeto. Esto permite algo que ninguna de las dos hace por separado: **contrastarlas**. Cuando una aeronave aparece en difusión local pero no en red, o al revés, el sistema tiene una discrepancia que informa sobre el estado del equipo, de la cobertura o de la intención del operador.

TABLA 4.2 – COMPARACIÓN DE LAS DOS VÍAS DE IDENTIFICACIÓN

CRITERIO	DIFUSIÓN LOCAL	DIFUSIÓN EN RED
Medio físico	Radiofrecuencia directa (Bluetooth / WiFi)	Internet, a través del proveedor de servicios
Alcance	Limitado al sensor terrestre (cientos de metros a pocos kilómetros)	Nacional, donde exista cobertura de datos
Dependencia de infraestructura	Requiere red de sensores desplegada	Requiere conectividad y proveedor operativo
Resistencia a falla	Alta: funciona aislada	Baja: una caída de enlace la elimina
Valor para fiscalización	Alto: prueba de presencia física local	Medio: depende de que el operador coopere
Detección del operador no cooperativo	Posible si el equipo difunde	No: el no cooperativo no publica

La última fila señala el límite honesto de toda la categoría: **la identificación remota solo identifica a quien coopera**. Un operador que decide no llevar el equipo, o que lo desactiva, no aparece por ninguna de las dos vías. Esto no invalida la tecnología —la matrícula del automóvil tampoco impide que alguien circule sin ella—, pero obliga a ser preciso en el discurso ante la autoridad: la identificación remota es la

herramienta de gestión del tránsito cooperativo, no un sistema de detección de intrusos.

La detección del tránsito no cooperativo es un problema distinto, que se resuelve con sensores de presencia en radiofrecuencia y, eventualmente, con sensores ópticos o acústicos. Es una capa adicional, con un costo, una complejidad regulatoria y un perfil de falsos positivos propios. Mezclar ambas capas en una misma promesa comercial es una forma segura de perder credibilidad ante un equipo técnico de autoridad.

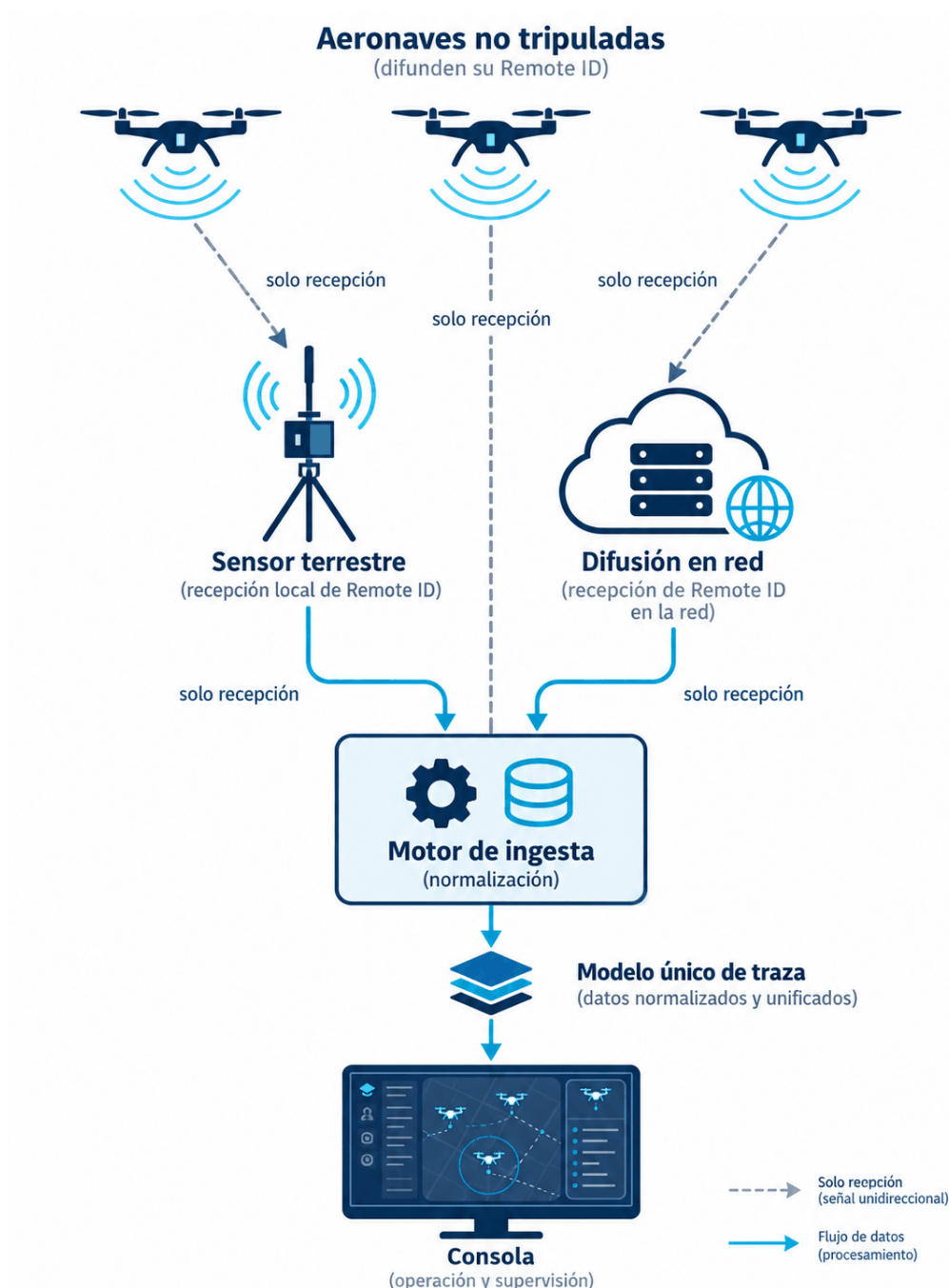


FIGURA 10 Arquitectura de recepción y normalización de identificación remota.

La red de sensores terrestres

Un sensor de identificación remota es, en el fondo, una caja pequeña con una antena, un receptor y un enlace de datos. Lo interesante no es la caja: es dónde se ponen y qué se hace con lo que reciben.

El criterio de despliegue no debe ser la cobertura geográfica sino la **relevancia operacional**. Cubrir el territorio nacional con sensores de identificación remota es económicamente absurdo e innecesario. Lo que importa es tener cobertura donde la ausencia de información produce riesgo o donde la presencia de información produce valor: entornos de aeródromo, zonas urbanas densas, corredores de operación recurrente, infraestructura crítica y volúmenes designados para operación experimental.

- **Entorno de aeródromo.** Es la zona donde el tránsito no tripulado y el tripulado se aproximan. Un sensor aquí produce el dato que la torre necesita para saber si hay algo abajo.
- **Zona urbana densa.** Es donde la densidad de población maximiza el riesgo terrestre y donde la operación no declarada es más probable.
- **Corredores recurrentes.** Rutas de inspección de tendidos, de entrega o de vigilancia perimetral que se repiten, y donde la cobertura continua tiene retorno.
- **Infraestructura crítica.** Instalaciones donde la sola presencia de un sobrevuelo no declarado constituye un evento de seguridad.
- **Volúmenes de operación experimental.** Las áreas designadas para pruebas supervisadas, donde la instrumentación completa es parte del protocolo.

Un principio de economía de infraestructura merece atención: **la misma infraestructura física puede alojar más de una función de vigilancia**. Un mismo emplazamiento con alimentación y enlace de datos puede recibir simultáneamente identificación remota de aeronaves no tripuladas y vigilancia dependiente automática de aeronaves tripuladas. El costo marginal de la segunda función sobre un emplazamiento ya desplegado es reducido, y el beneficio es sustancial: por primera vez, una imagen única del espacio aéreo de baja cota que contiene tanto el tránsito tripulado como el no tripulado.

El valor no está en ver drones. Está en ver, en la misma pantalla, el dron y el helicóptero que se le acerca.



FIGURA 11 Imagen referencial de un nodo terrestre de recepción.

Del identificador a la traza

Recibir mensajes de identificación no es todavía vigilancia. Vigilancia es tener una traza: un objeto persistente, con identidad estable, historia, vector y calidad declarada, que un supervisor pueda interpretar sin entrenamiento especial.

El camino desde el mensaje hasta la traza pasa por un motor de fusión, y ese motor hace tres cosas que ningún receptor hace por sí solo. **Deduplica:** si tres sensores reciben la misma aeronave, hay una traza y no tres. **Correlaciona:** asocia la traza con la Operación 4D autorizada correspondiente y con el registro de la aeronave. **Califica:** declara de qué fuente viene cada posición, con qué latencia llegó y cuánto ha envejecido, para que la representación no mienta sobre su propia confianza.

La tercera función es la que distingue un sistema aeronáutico de una aplicación de seguimiento. En aviación, un símbolo en pantalla que no declara la antigüedad de su dato es un símbolo peligroso, porque un operador humano asume que lo que ve es lo que hay. La práctica aeronáutica clásica resolvió esto hace décadas con el concepto de traza en extrapolación: cuando deja de llegar actualización, el símbolo cambia de aspecto, después se marca como perdido y finalmente desaparece. Trasladar esa disciplina al mundo no tripulado no es un capricho estético: es la diferencia entre una herramienta de supervisión y un adorno.

El puente con la vigilancia convencional

Una decisión de arquitectura temprana tiene consecuencias institucionales: normalizar la identificación remota al mismo modelo de datos con que se representa la vigilancia convencional. Técnicamente significa mapear el identificador, la posición, la altitud y el vector de un mensaje de identificación remota a los mismos campos con que se representa un blanco de vigilancia dependiente automática, y tratar los atributos sin equivalente —en particular, la ubicación del piloto— como extensión propia del dominio no tripulado.

El beneficio de esa decisión es que la sala de control ve **una sola imagen**. El controlador o el supervisor no tiene que mirar dos pantallas ni aprender dos simbologías: el tránsito tripulado y el no tripulado conviven en el mismo modelo, con la fuente declarada en el símbolo. Para una autoridad aeronáutica, esa unificación es más persuasiva que cualquier argumento comercial, porque habla su idioma.

RECOMENDACIÓN TÉCNICA

Diseñar la ingesta de identificación remota con un modelo de traza unificado desde el primer día, aunque inicialmente solo exista una fuente. Añadir la segunda fuente después es trivial si el modelo es único, y es una reescritura si cada fuente tiene el suyo.

Declarar siempre la **fuente** y la **edad** del dato en el objeto de traza, y propagar ambos atributos hasta la interfaz. La consola debe poder mostrar que una posición tiene ocho segundos de antigüedad; ocultarlo es un defecto de seguridad, no una decisión de diseño visual.

05

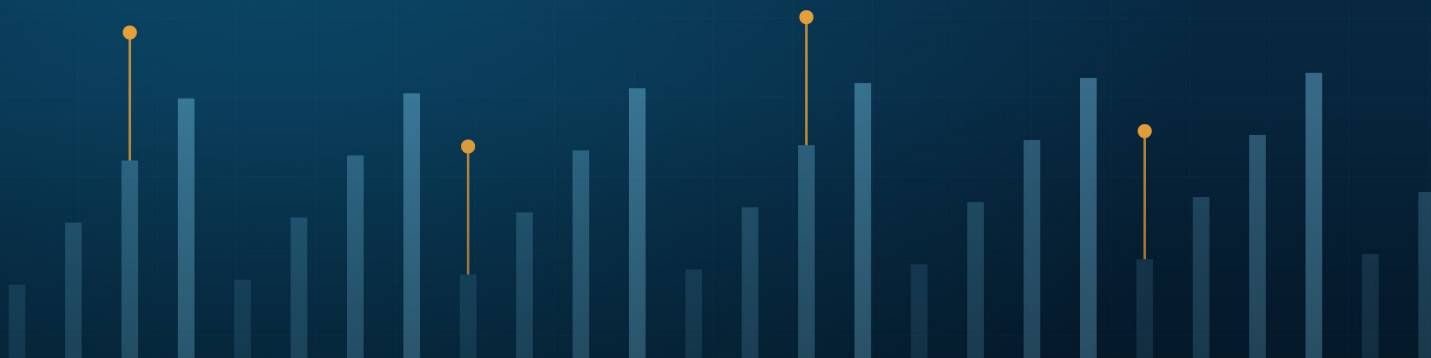
CAPÍTULO CINCO

El gemelo digital de la baja cota



Bajo los ciento veinte metros el riesgo no lo definen las zonas: lo definen los obstáculos finos y la gente que está debajo.

- Obstáculos: el detalle que las cartas no traen
- Densidad de población y riesgo terrestre
- Proteger y digitalizar: dos capas, un dato
- Fuentes, linaje y actualización



Obstáculos: el detalle que las cartas no traen

Una carta aeronáutica es un instrumento magnífico para el vuelo que fue diseñada a servir. Describe superficies limitadoras, ayudas a la navegación, áreas de restricción y obstáculos significativos para la aproximación y el despegue. Lo que no describe —porque nunca tuvo que hacerlo— es el detalle de lo que hay entre cero y ciento veinte metros sobre un barrio cualquiera.

El vuelo no tripulado de baja cota necesita un mapa de otra naturaleza. No necesita saber dónde está el cono de aproximación: necesita saber que en esa esquina hay una antena de treinta y cinco metros, que ese tendido cruza el valle a cuarenta, que esa grúa de obra estará ahí tres meses más y que ese edificio tiene ocho pisos y el de al lado dieciséis. Necesita, en una palabra, un **gemelo digital del terreno construido**.

TABLA 5.1 — TAXONOMÍA DE OBSTÁCULOS VERTICALES RELEVANTES EN BAJA COTA

CATEGORÍA	EJEMPLOS	PARTICULARIDAD OPERACIONAL
Estructuras altas fijas	Torres de telecomunicaciones, mástiles, antenas, chimeneas industriales.	Bien documentadas cuando superan umbrales de notificación; mal documentadas por debajo de ellos.
Tendidos eléctricos	Torres de alta tensión y los conductores entre ellas.	Los conductores son prácticamente invisibles en vuelo y no aparecen en la mayoría de las cartografías.
Estructuras temporales	Grúas de obra, andamiajes, torres de iluminación de eventos.	Aparecen y desaparecen en semanas. Ninguna cartografía estática las captura.
Generación eólica	Aerogeneradores y sus palas en rotación.	El obstáculo real no es la torre sino el disco barrido por las palas.
Edificación	Edificios de altura variable en trama urbana.	Define el techo volable calle a calle. Requiere modelo tridimensional, no un polígono plano.
Relieve	Terreno natural, quebradas, laderas.	La altura sobre el terreno cambia con el terreno: una banda de altura constante no es una superficie plana.

La última fila es la que más sorpresas produce en la operación real. Cuando una autorización declara «hasta ciento veinte metros sobre el terreno», está declarando una superficie que sigue el relieve, no un plano horizontal. En terreno accidentado —que es buena parte de Chile— la diferencia entre ambas interpretaciones puede ser de cientos de metros de altitud absoluta. Un sistema que verifica conformidad comparando altitud geodésica contra un techo plano producirá falsas desviaciones en la ladera y no detectará desviaciones reales en el valle. La única forma correcta es disponer de un modelo digital de elevación y calcular la altura sobre el terreno punto a punto.

Densidad de población y riesgo terrestre

Si hay un dato que condensa todo el riesgo del vuelo no tripulado en un solo número, es cuántas personas hay debajo. Toda la metodología moderna de evaluación de riesgo descansa sobre esa variable, y hasta hace poco la industria la estimaba a ojo.

La secuencia lógica es simple. Una aeronave que pierde control cae dentro de un área que depende de su altura, su velocidad y su masa. El daño esperado depende de cuántas personas se encuentren en esa área y de la energía del impacto. Por lo tanto, la clase de riesgo terrestre de una operación es una función de la dimensión característica de la aeronave y de la densidad de población bajo el volumen declarado.

Lo que cambia cuando ese cálculo se automatiza no es la precisión —aunque también—, sino la **naturaleza del ejercicio**. Con una malla de densidad de población cargada, el sistema recorta el ráster con el polígono declarado, obtiene la densidad efectiva bajo la operación y deriva la clase de riesgo sin intervención humana. El operador recibe el resultado en el momento de planificar, no tres días después, y puede iterar: mover el polígono doscientos metros, cambiar la ventana horaria a una franja de menor ocupación, reducir la altura para acotar el área de impacto.

Cuando el riesgo se calcula al planificar, el operador deja de justificar su misión y empieza a diseñarla.



FIGURA 12 Imagen referencial de un tendido eléctrico como obstáculo de baja cota.

ADVERTENCIA METODOLÓGICA SOBRE DENSIDAD DE POBLACIÓN

Las mallas globales de densidad de población son **promedios de residencia**, no ocupación instantánea. Un polígono sobre un parque industrial tendrá densidad residencial baja y ocupación diurna alta; un estadio vacío y uno lleno son el mismo píxel.

Un sistema honesto usa la malla como línea base y permite al operador o a la autoridad declarar **concentraciones temporales** —eventos, manifestaciones, jornadas de alta afluencia— como restricción adicional. Presentar una clase de riesgo derivada solo de la malla como si fuera una verdad operacional es un error que puede costar caro.

Existe además una asimetría relevante para cualquier autoridad: el riesgo terrestre es el único de los dos riesgos que el operador puede reducir directamente mediante el diseño de la misión. El riesgo aéreo depende de la clase de espacio y del tránsito ajeno; el terrestre depende de dónde y cuándo se decide volar. Mostrar esa variable durante la planificación permite orientar la operación hacia condiciones de menor exposición sin recurrir necesariamente a una prohibición.

CAPÍTULO 05 · SECCIÓN 5.3

Proteger y digitalizar

El mismo conjunto de datos sirve a dos propósitos distintos, con destinatarios, naturaleza y modelos de sostenibilidad diferentes.

TABLA 5.2 — DOS CAPAS SOBRE EL MISMO DATO

DIMENSIÓN	CAPA DE PROTECCIÓN	CAPA DE DIGITALIZACIÓN
Destinatario	La autoridad aeronáutica y el Estado.	El operador UAS y su mandante.
Pregunta que responde	¿Está este vuelo afectando a la aviación tripulada o a infraestructura crítica?	¿Dónde y hasta qué altura puedo volar, y cómo lo demuestro?
Naturaleza	Regulatoria. Deber del Estado, no negociable.	Comercial. Servicio escalable al operador.
Datos que usa	Geo-zonas, aeródromos, infraestructura crítica, separación con tránsito tripulado.	Obstáculos finos, densidad de población, techos por celda, evaluación de riesgo.
Se cobra	No. Es la contrapartida que justifica el sistema ante la autoridad.	Sí. Es el producto que el operador paga porque le ahorra trabajo y le da evidencia.

Esta distinción no es un artificio de marketing: es la que hace viable el modelo institucional completo. La capa de protección es lo que un Estado necesita y no puede delegar en su decisión final; la capa de digitalización es lo que el mercado necesita y el Estado no tiene por qué producir. Un proveedor que pretenda cobrar por la primera se topará con una objeción legítima; uno que solo ofrezca la segunda no tendrá nada que decirle a la autoridad.

El punto de encuentro es que **el dato es el mismo**. La geometría del tendido de alta tensión que protege al helicóptero de línea es la misma que le dice al operador de inspección dónde puede volar. La malla de población que fundamenta la restricción es la que calcula la clase de riesgo de la misión. Construir una vez y servir a los dos destinatarios es, a la vez, eficiencia técnica y coherencia argumental.

Fuentes, linaje y actualización

Todo lo anterior descansa sobre una pregunta incómoda: ¿de dónde sale el dato, y quién responde por él? En aviación esa pregunta no es retórica. Un dato aeronáutico sin origen declarado es un dato que no se puede usar para decidir.

El conjunto de datos de baja cota se arma necesariamente con fuentes de naturaleza distinta, y la única forma honesta de manejarlo es **declarar el linaje elemento por elemento**. En la práctica, las fuentes se agrupan en tres categorías con niveles de confianza muy diferentes.

- **Fuente aeronáutica oficial.** Publicaciones de información aeronáutica, avisos a los operadores aéreos, cartas de obstáculos. Es la fuente autoritativa: cuando existe, manda. Su límite es la cobertura, porque se publica lo que es significativo para la aviación tripulada.
- **Fuente estatal no aeronáutica.** Cartografía nacional, modelos de elevación, catastros de infraestructura, áreas protegidas. Confiable y de cobertura amplia, pero con ciclos de actualización que no fueron diseñados para la operación aérea.
- **Fuente abierta colaborativa.** Cartografía comunitaria y bases de datos abiertas de edificación. Cobertura extraordinaria y actualización rápida; garantía formal, ninguna. Es insustituible para obstáculos finos y debe tratarse siempre como dato de apoyo, nunca como dato autoritativo.

La consecuencia práctica de esta tipología es una regla de diseño: **ningún elemento del conjunto de datos debe existir sin un atributo que declare de dónde vino y cuándo se actualizó**. Ese atributo es lo que permite, ante una discrepancia, saber qué prevalece; ante una auditoría, reconstruir la decisión; y ante una mejora de fuente, sustituir el elemento sin rehacer la base.

EL PROBLEMA DE LA ACTUALIZACIÓN

Una grúa de obra dura meses. Una restricción temporal dura horas. Un edificio dura décadas. Un conjunto de datos de baja cota con un único ciclo de actualización está, por construcción, equivocado en alguna de las tres escalas.

La arquitectura correcta separa **el dato estructural** —terreno, edificación, tendidos—, que se actualiza en ciclos largos y versionados, del **dato dinámico** —restricciones temporales, concentraciones, obstáculos transitorios—, que entra como restricción con vigencia declarada y expira sola.

Confundir ambos es la causa más frecuente de que un sistema UTM empiece a dar respuestas que el operador aprende a ignorar. Y un sistema cuyas alertas se ignoran es, a efectos de seguridad operacional, un sistema apagado.

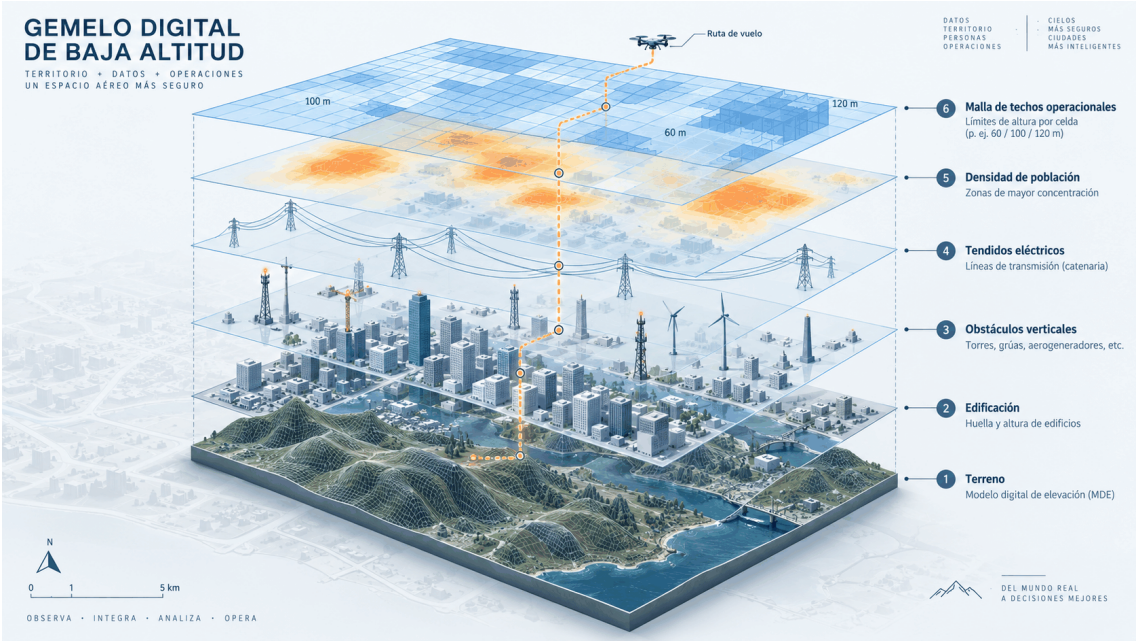
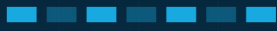


FIGURA 13 Modelo conceptual por capas del gemelo digital de baja cota.



Un mapa que solo prohíbe
es una barrera.

Un mapa que dice hasta
qué altura se puede volar
es una habilitación.

CÓNDOR UTM · EDICIÓN V.01 · CAPÍTULO 05



120 m

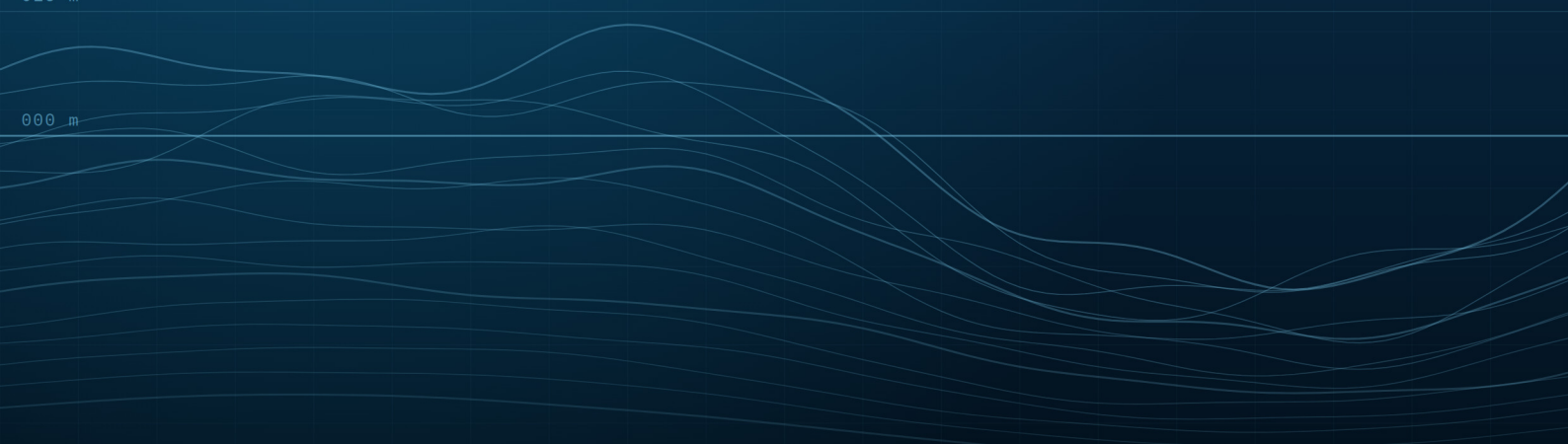
105 m

075 m

045 m

015 m

000 m



06

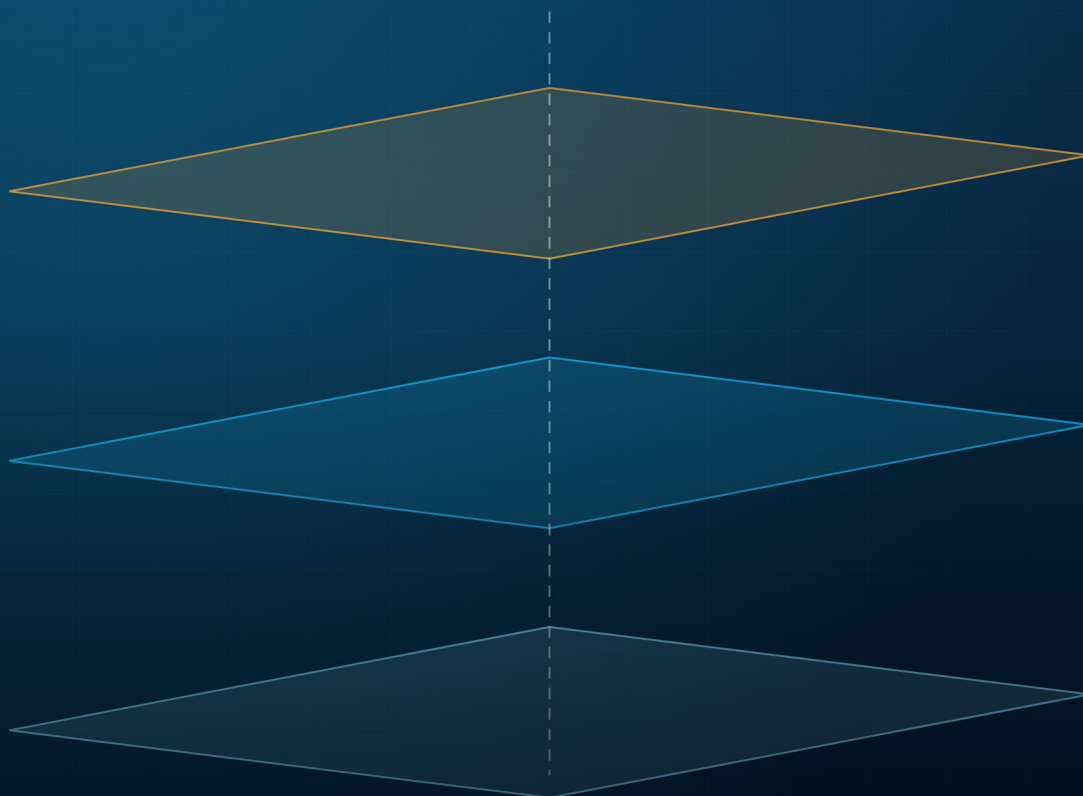
CAPÍTULO SEIS

CÓNDOR: la arquitectura chilena



Hasta aquí, el concepto. Desde aquí, la implementación: cómo está construido el sistema, qué partes funcionan hoy y qué partes faltan.

- Tres capas y un contrato
- El Servicio de Información Común
- La ventana estratégica
- Matriz de conformidad, publicada sin maquillaje



Tres capas y un contrato

La arquitectura de CÓNDOR es el resultado de un error corregido a tiempo. Durante la primera fase del programa se construyó lo que un controlador de tránsito aéreo construye naturalmente: una consola de situación. Era buena, funcionaba y resolvía el diez por ciento del problema. El reencuadre de mediados de 2026 consistió en entender que esa consola no era el sistema, sino una de sus ventanas.

El sistema se organiza hoy en tres capas superpuestas que comparten los mismos motores y los mismos datos, y que se comunican mediante un contrato explícito.

TABLA 6.1 — LAS TRES CAPAS DE CÓNDOR

CAPA	QUÉ CONTIENE	A QUIÉN SIRVE
Capa de operador	Portal de planificación, gestión de flota y tripulación, listas de verificación, bitácora automática, interfaz de programación para sistemas de terceros.	El operador UAS y su organización. Es la capa que se usa a diario y la que sostiene el modelo de servicio.
Capa de servicios	Motores compartidos: geo-conciencia, deconflicción estratégica, evaluación de riesgo, identificación remota, monitoreo de conformidad, meteorología.	A las otras dos capas. No tiene interfaz propia: es la maquinaria.
Ventana estratégica	Consola de situación, presentación vertical, gestión de mensajería aeronáutica, supervisión multipantalla, traspaso entre posiciones.	La autoridad y la supervisión. Es la vista de Estado sobre el sistema.

El orden de la tabla no es casual: refleja la jerarquía correcta de construcción. La capa de operador es el producto; la capa de servicios es el motor; la ventana estratégica es el argumento institucional. Construir en orden inverso —que es lo que hace instintivamente un equipo con formación de control de tránsito aéreo— produce un sistema impresionante que nadie usa.

La consola no se descarta: cambia de función. Deja de ser el sistema y pasa a ser la ventana por la que el Estado lo mira.

— Reencuadre arquitectónico, junio de 2026



FIGURA 14 Arquitectura funcional de CÓNDOR: capas de operación, servicios e interfaz común.

El **contrato** que une las tres capas es la Operación 4D descrita en el capítulo tercero. El operador la crea, los motores la evalúan, la ventana estratégica la muestra y la vigilancia la verifica contra la realidad. Un solo objeto, tres vistas, ninguna duplicación de dato.

CAPÍTULO 06 · SECCIÓN 6.2

El Servicio de Información Común

Una decisión de arquitectura define el modelo por encima de las demás: la integración entre sistemas se resuelve publicando un contrato entre ellos, no fusionándolos.

El programa CENAE opera dos sistemas con funciones distintas. Uno es la plataforma de gestión operacional que usan los operadores para planificar, evaluar riesgo, administrar flota y tripulación y gestionar sus colas de autorización. El otro es CÓNDOR, que ejerce la supervisión y la vigilancia soberana: consola de situación, ingesta de identificación remota y vigilancia dependiente, verificación de conformidad.

La tentación evidente era fusionarlos en un solo producto. La decisión fue la contraria: **mantenerlos separados y unirlos por un Servicio de Información Común** con interfaz publicada. La plataforma de operador publica las Operaciones 4D; CÓNDOR las supervisa. Nadie duplica base de datos y cada sistema puede evolucionar a su ritmo.

TABLA 6.2 — FUNCIONES DEL SERVICIO DE INFORMACIÓN COMÚN

FUNCIÓN	DESCRIPCIÓN
Publicación de operaciones	Un sistema externo publica una Operación 4D. El servicio ejecuta geo-conciencia y deconflicción estratégica del lado del servidor y devuelve el veredicto con el detalle de conflictos y zonas afectadas.
Consulta de operaciones	La supervisión y los demás actores consultan las operaciones vigentes, filtradas por estado.
Transición de estado	Los cambios de estado —activación, cierre, rechazo— se registran a través del mismo contrato, dejando traza.
Publicación de zonas	Fuente única de las geo-zonas y restricciones vigentes para todos los consumidores.
Tránsito en vivo	Feed de posiciones para verificación de conformidad por parte de sistemas externos.

EL PRINCIPIO QUE GOBIERNA TODA LA ARQUITECTURA

El backend decide, el frontend representa. Ninguna decisión aeronáutica —autorizar, rechazar, declarar no conformidad, calcular riesgo— se toma en la interfaz. Todas se toman del lado del servidor, se registran y se pueden reproducir.

Esto parece una obviedad de ingeniería y es, en realidad, el requisito central de auditabilidad. Una decisión tomada en el navegador del usuario no es reproducible, no es atribuible y no resiste una investigación de incidente.

Este diseño tiene una consecuencia estratégica concreta. Un Servicio de Información Común con interfaz publicada es, por definición, **multiproveedor**: cualquier otro sistema que respete el contrato puede publicar y consultar. Esto convierte una objeción previsible de la autoridad —«esto crea un monopolio privado sobre el espacio aéreo»— en una respuesta técnica verificable: el contrato está publicado, el acceso se otorga por credencial y la arquitectura no impide que existan otros proveedores. La ruta de evolución natural es migrar ese contrato hacia el estándar internacional de interoperabilidad entre proveedores y el servicio de descubrimiento y sincronización asociado.

La ventana estratégica

La consola de situación de CÓNDOR es, probablemente, la pieza que más impresiona en una demostración y la que menos hay que confundir con el sistema. Su función es institucional antes que operacional: es la evidencia visible de que el Estado puede ver.

Lo que la consola presenta es una imagen unificada del espacio aéreo de baja cota: trazas de aeronaves no tripuladas recibidas por identificación remota, trazas de aeronaves tripuladas recibidas por vigilancia dependiente, volúmenes de las operaciones autorizadas superpuestos sobre el mapa, geo-zonas vigentes, obstáculos con su altura y una presentación de situación vertical que muestra el perfil de altura contra el terreno.

- **Imagen única.** Tripulado y no tripulado en la misma pantalla, con la fuente del dato declarada en cada símbolo.
- **Volúmenes autorizados.** No solo dónde está la aeronave, sino dónde se le permitió estar. La discrepancia entre ambos es visible de un vistazo.
- **Posición del piloto.** El mensaje de sistema de la identificación remota se representa como un símbolo propio, unido a su aeronave. Es el dato que ningún sistema de vigilancia convencional entrega.
- **Edad del dato.** Cada traza declara la antigüedad de su última actualización y transita a extrapolación y luego a pérdida cuando el dato deja de llegar.
- **Presentación vertical.** Perfil de altura contra terreno y contra la banda autorizada, que es donde se detecta la desviación vertical que el plano no muestra.

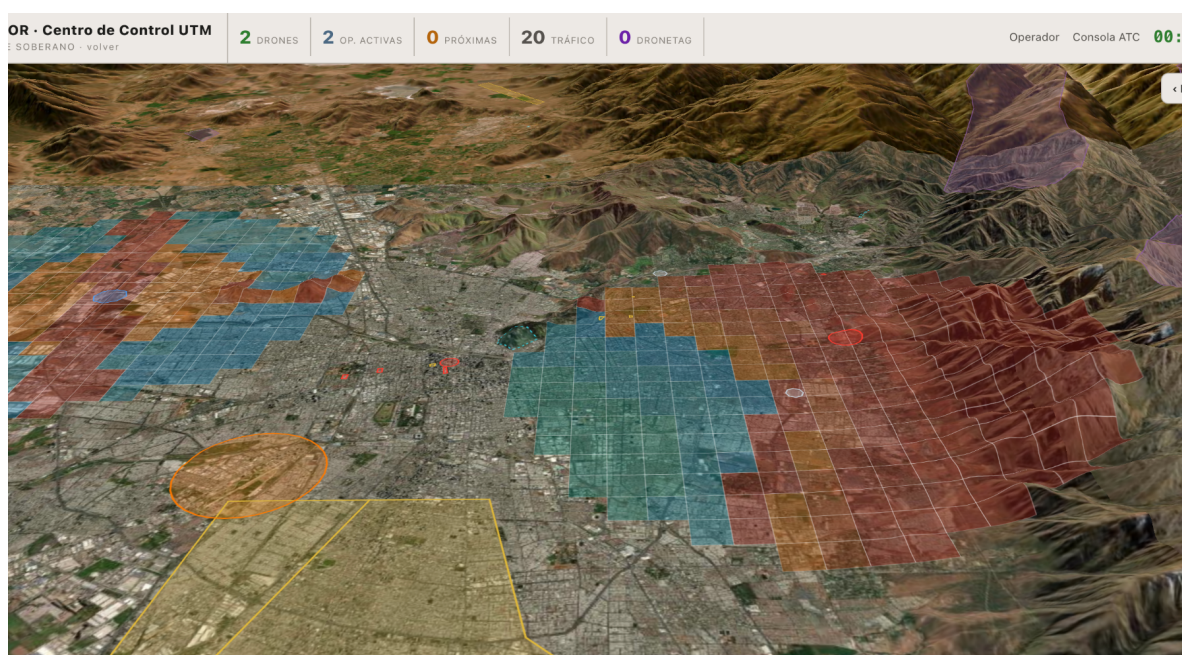


FIGURA 15 Captura operativa de CÓNDOR: consola de supervisión y representación del entorno.

El alcance de esta capa debe quedar delimitado: no es un sistema de control de tránsito aéreo y no debe presentarse como tal. No emite instrucciones, no gestiona separación táctica entre aeronaves y no sustituye funciones de una dependencia de servicios de tránsito aéreo. Es una herramienta de supervisión y conciencia situacional. Presentarla de otro modo ante la autoridad introduce una ambigüedad innecesaria en la conversación regulatoria.

CAPÍTULO 06 · SECCIÓN 6.4

Matriz de conformidad: lo que hay y lo que falta

Esta sección expone deliberadamente las brechas del sistema. La razón es metodológica: en aviación, declarar una brecha antes de que la encuentre el auditor fortalece la credibilidad técnica; ocultarla o presentar como completo lo que aún no lo está produce el efecto contrario.

El programa evaluó treinta y tres elementos funcionales contra el marco europeo de U-space y contra los estándares de interoperabilidad de referencia. El resultado a la fecha de cierre de esta edición es el siguiente.

TABLA 6.3 – RESULTADO GLOBAL DE LA EVALUACIÓN DE CONFORMIDAD

ESTADO	ELEMENTOS	LECTURA
Conforme	17	El elemento existe, opera y su decisión se toma del lado del servidor.
Parcial	11	El elemento existe pero le falta una pieza identificada: trazabilidad, umbral explícito, abstracción o cobertura.
Falta	5	El elemento no existe todavía. Cuatro de los cinco son de la capa táctica o de interfaz con gestión de tránsito aéreo.

Evaluación interna sobre 33 elementos funcionales, con corte a septiembre de 2026. La matriz completa por módulo se conserva como documento de control del programa.

Qué está conforme

El núcleo aeronáutico está construido y opera. El espacio aéreo digital —geo-zonas, superficies, regiones de información de vuelo, techos operacionales— está estructurado y servido. Los registros de operador, de aeronave, de piloto y de autorización existen y se mantienen. La geo-conciencia decide del lado del servidor. El servicio de autorización implementa la lógica de intención operacional del estándar de interoperabilidad. La detección de conflicto estratégico funciona, y —esto es menos común de lo que parece— también la **resolución**, con la jerarquía de ventana temporal, banda de altura y geometría descrita en el capítulo tercero. La identificación en red opera, el monitoreo de conformidad cierra el lazo y las interfaces de supervisor y de operador están en producción.

Qué está parcial

- **Trazabilidad regulatoria.** Falta versionado inmutable de cada decisión con vigencia declarada y retención mínima garantizada. Es la brecha crítica para una auditoría.
- **Umbrales de desviación explícitos.** Los márgenes horizontal, vertical y temporal deben quedar escritos en cada autorización, no configurados globalmente.
- **Compuerta de activación.** La revalidación final en el momento del despegue existe conceptualmente pero debe formalizarse como paso bloqueante.

- **Meteorología como restricción.** El dato meteorológico se presenta, pero todavía no bloquea la activación cuando excede los límites declarados de la aeronave.
- **Trayectoria en cuatro dimensiones.** Falta el muestreo de trayectoria y la distinción formal entre volumen operacional, de contingencia y de emergencia.
- **Gestión de seguridad de la información.** El sistema de gestión debe formalizarse: control de acceso por rol, no repudio, gestión de certificados y respuesta a incidentes.
- **Interoperabilidad entre proveedores.** El andamiaje está presente; falta el intercambio federado efectivo con otros proveedores.

Qué falta

- **Motor de fusión de tránsito.** Deduplicación, correlación entre fuentes, calificación de confianza y tratamiento de dato envejecido por fuente.
- **Reconfiguración dinámica del espacio aéreo.** La capacidad de que la autoridad segregue, libere o reconfigure volúmenes en tiempo real y que el cambio se propague a todas las operaciones afectadas.
- **Gestión de emergencias.** Motor de contingencia con máquina de estados del enlace de mando: conectado, degradado, perdido.
- **Auditoría y grabación.** Registro inmutable con retención garantizada. Es la contraparte técnica de la trazabilidad regulatoria.
- **Bus de eventos.** Infraestructura de notificación orientada a eventos que desacople la generación de la alerta de su distribución.

LECTURA ESTRATÉGICA DE LA BRECHA

Cuatro de los cinco elementos faltantes pertenecen a la **capa táctica y a la interfaz con la gestión de tránsito aéreo**. Ninguno de ellos es prerequisite para iniciar operación supervisada: el ecosistema que opera espacio aéreo compartido en Estados Unidos desde 2025 funciona sin vigilancia táctica, sin redes de seguridad y sin reconfiguración dinámica.

El único faltante que sí es bloqueante para una habilitación formal es el de **auditoría y grabación**, junto con la trazabilidad regulatoria de la lista de parciales. Son, además, los dos más baratos de cerrar: no requieren hardware ni reescritura, requieren disciplina de versionado.

Dicho de otro modo: la brecha entre «sistema funcional» y «sistema demostrable ante un auditor» es, en este programa, de disciplina documental y no de ingeniería.

Soberanía del dato

Hay una decisión de diseño que responde a doctrina institucional, no a ingeniería, y debe explicitarse para evitar confundirla con nacionalismo tecnológico: el sistema está concebido para operar en instalaciones del Estado o bajo su control directo.

El argumento no es ideológico. Es operacional y tiene tres componentes.

- **Continuidad.** Un sistema que gestiona espacio aéreo no puede depender de que un proveedor extranjero mantenga un servicio disponible, ni de que una relación comercial se mantenga vigente. La disponibilidad del servicio de tránsito es una obligación del Estado y no admite dependencia contractual como único respaldo.
- **Jurisdicción del dato.** El registro de quién voló, dónde, cuándo y con qué autorización es material probatorio de fiscalización y de investigación de accidentes. Su custodia, su cadena de integridad y su disponibilidad ante requerimiento judicial deben estar sujetas a jurisdicción nacional.
- **Capacidad institucional.** Un sistema desplegado localmente y documentado permite que la autoridad forme personal propio, audite el comportamiento real del software y entienda el sistema que supervisa. Una plataforma opaca alojada fuera del país convierte a la autoridad en usuaria de algo que no puede inspeccionar.

Esto no significa aislamiento. El sistema debe hablar los estándares internacionales de interoperabilidad precisamente para poder federarse con proveedores de otros Estados cuando la operación transfronteriza lo requiera. Soberanía del dato e interoperabilidad no son términos opuestos: **la soberanía se ejerce sobre dónde vive el dato y quién responde por él; la interoperabilidad se ejerce sobre el formato en que se intercambia.**

Soberanía no es aislamiento. Es saber dónde está el registro y quién responde por él.

07

CAPÍTULO SIETE

El camino regulatorio



La ruta crítica de este programa dejó de ser técnica hace tiempo. Es regulatoria. Este capítulo describe el marco, el modelo institucional y la secuencia de habilitación.

- Facultades indelegables y modelo híbrido
- La norma chilena: lo que dice y lo que no
- El precedente estadounidense
- Sandbox, compuertas y secuencia



CAPÍTULO 07 · SECCIÓN 7.1

Facultades indelegables y modelo híbrido

Toda conversación de UTM con una autoridad aeronáutica llega, tarde o temprano, al mismo punto: ¿esto implica delegar funciones del Estado? La respuesta es no, y debe poder demostrarse de forma simple mediante una matriz de funciones y responsabilidades.

La autoridad aeronáutica chilena ha sostenido por escrito que el control de tránsito aéreo y la ayuda a la navegación aérea son facultades que le corresponden y que no se delegan. El programa CÓNDOR no discute esa posición: la considera correcta y la adopta como restricción de diseño. La pregunta relevante no es si esas facultades se delegan, sino **qué hay en el UTM que no es control de tránsito aéreo**.

Y hay bastante. La identificación de aeronaves y operadores no es control de tránsito. La provisión de información de geo-conciencia no es control de tránsito. La tramitación digital y la deconflicción estratégica de intenciones declaradas antes del despegue no es control de tránsito. La verificación de conformidad a posteriori no es control de tránsito. La provisión de información meteorológica al operador no es control de tránsito. Son servicios accesorios, técnicamente delegables y, en el marco europeo, expresamente asignados a proveedores certificados bajo supervisión de la autoridad.

TABLA 7.1 — EL MODELO HÍBRIDO, CAPA POR CAPA

CAPA	QUIÉN OPERA	FUNDAMENTO
Control de tránsito aéreo y ayuda a la navegación aérea	La autoridad. Indelegable.	Posición expresa de la autoridad aeronáutica chilena.
Plataforma tecnológica del sistema UTM	El proveedor provee y licencia a la autoridad.	Compatible con la facultad indelegable: la herramienta no es la función.
Servicios U-space delegables: identificación, geo-conciencia, autorización, información de tránsito, conformidad, meteorología	El proveedor, bajo supervisión y habilitación de la autoridad.	Modelo del Reglamento (UE) 2021/664.
Relación comercial con operadores: planificación, gestión de flota, registro, evidencia de cumplimiento	El proveedor.	Mercado. No hay función estatal comprometida.

EL MENSAJE, EN UNA FRASE

La autoridad mantiene la autoridad y el control. El proveedor aporta la tecnología y opera los servicios accesorios que la autoridad decida habilitar, bajo su supervisión y respondiendo por ellos.

Este no es un modelo inventado para Chile: es el modelo que Europa escribió como reglamento vinculante y que Estados Unidos construyó como práctica industrial aceptada. La discusión no es si funciona, sino cómo se adapta.

La norma chilena: lo que dice y lo que no

Cualquier propuesta seria debe partir de una lectura honesta del texto vigente. La norma chilena que rige la operación de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia ha evolucionado de forma significativa, y su versión más reciente introduce cambios que acercan a Chile a la práctica internacional en varios frentes y la dejan explícitamente muda en otro.

El texto más reciente de la norma sectorial organiza la operación en **categorías de severidad definidas por masa máxima de despegue**, en una escala que va desde los aparatos por debajo de doscientos cincuenta gramos hasta los de ciento cincuenta y nueve kilogramos, y adopta un enfoque basado en la evaluación del riesgo en lugar de un esquema puramente prescriptivo por áreas. Incorpora además de manera explícita las operaciones más allá de la línea visual directa y exige, para ellas, sistema de identificación remota en vuelo.

TABLA 7.2 – CATEGORÍAS DE SEVERIDAD POR MASA MÁXIMA DE DESPEGUE

CATEGORÍA	MASA MÁXIMA DE DESPEGUE
S1	Hasta 250 gramos
S2	Hasta 4 kilogramos
S3	Hasta 9 kilogramos
S4	Hasta 25 kilogramos
S5	Hasta 159 kilogramos

Escala de severidad conforme al apéndice de categorización de la norma sectorial chilena de operaciones RPAS. Se reproduce como referencia conceptual; la versión autoritativa es la publicada por la autoridad aeronáutica.

Dos lecturas merecen destacarse. La primera es **positiva y sustantiva**: al exigir identificación remota para las operaciones más allá de la línea visual directa, la norma incorpora la pieza técnica sobre la que se construye todo sistema UTM. Sin ese requisito no hay dato; con él, el dato existe y solo falta quien lo recoja y lo administre. Es, probablemente, el mayor avance regulatorio del ciclo.

La segunda es **estructural y honesta**: el texto no contiene los términos gestión de tránsito de aeronaves no tripuladas, U-space ni proveedor de servicios U-space. No es una omisión reprochable —ninguna norma tiene que anticipar todas las figuras—, pero define con precisión el estado de la cuestión: **Chile tiene regulada la operación y no tiene regulada la figura del proveedor de servicios**. Ese es exactamente el vacío que hay que llenar, y decirlo con esta claridad ahorra meses de conversación indirecta.

DISTINCIÓN QUE ESTA EDICIÓN SE OBLIGA A HACER

Exigencia normativa. La operación de RPAS en Chile se rige por la norma sectorial vigente y por las instrucciones de la autoridad. La identificación remota es exigible en los casos que esa norma define.

Vacío normativo. No existe en Chile figura de habilitación o certificación de proveedor de servicios U-space, ni designación de volúmenes U-space, ni definición de servicio de información común.

Recomendación técnica. Cerrar ese vacío mediante enmienda o circular sobre la norma sectorial más un régimen de operación experimental supervisada, en lugar de esperar a una norma completa. Es lo que hicieron los dos marcos de referencia.

El precedente estadounidense

Existe un argumento más útil que cualquier presentación: el modelo ya fue implementado, opera en producción y su trayectoria puede estudiarse. Ese precedente merece una revisión detallada porque responde de forma directa a la objeción más natural de cualquier autoridad.

Desde 2025 opera en Estados Unidos un ecosistema de gestión de tránsito no tripulado en espacio aéreo compartido, nacido de una necesidad concreta: varios operadores de entrega con drones volando en la misma zona metropolitana y sin forma de coordinarse entre sí. La industria se organizó, adoptó el estándar de interoperabilidad entre proveedores, firmó un acuerdo de gobernanza y presentó el esquema a la autoridad federal, que lo aceptó por desempeño en lugar de crear una certificación nueva.

- **No hubo certificación de proveedor.** La autoridad federal aceptó los servicios mediante un mecanismo de aceptación basado en desempeño, apoyado en estándares de consenso y en gobernanza industrial verificable.
- **El alcance inicial fue mínimo y deliberado.** Solo coordinación estratégica entre proveedores. Sin radar, sin redes de seguridad tácticas, sin intercambio de datos de vigilancia en formato convencional.
- **La calificación fue automatizada.** Existe un banco de pruebas reproducible que verifica el comportamiento de cada proveedor contra líneas base de prueba antes de admitirlo al ecosistema.
- **La incorporación fue por compuertas.** Calificación automatizada, luego simulación del ecosistema completo, y solo después vuelos de producción.
- **La gobernanza es pública.** Especificaciones, matriz de trazabilidad de requisitos, acuerdo de gobernanza y evaluación independiente están publicados y son descargables.

Para Chile, este precedente tiene tres implicaciones inmediatas. **Primera:** responde a la objeción «no existe norma para certificarlos» con un caso real donde tampoco existía y se resolvió por desempeño. **Segunda:** valida la decisión de no exigirse a sí mismo una capa táctica completa antes de iniciar; el ecosistema estadounidense opera sin ella. **Tercera:** entrega una estructura de incorporación probada —las tres compuertas— que una autoridad puede adoptar como diseño de su propio régimen experimental en lugar de partir de una hoja en blanco.

Existe, sin embargo, una diferencia relevante. En el modelo estadounidense la autoridad quedó fuera de la operación de la capa UTM; en Chile, la autoridad exige y debe ser el actor central. La diferencia no invalida el precedente, pero sí condiciona su aplicación. El modelo híbrido chileno es institucionalmente más conservador que el estadounidense y debe evaluarse desde esa realidad.

La pregunta que hay que llevarle a la autoridad no es «¿nos certifican?». Es «¿bajo qué régimen experimental supervisado nos permiten demostrarlo?».

— Capítulo 07



FIGURA 16 Imagen referencial de una mesa técnica de coordinación.

CAPÍTULO 07 · SECCIÓN 7.4

Sandbox, compuertas y secuencia

El último tramo de este capítulo es el más concreto: cómo se pasa de un sistema que funciona a un sistema habilitado. La propuesta se organiza en tres compuertas y una secuencia de implementación que se considera no negociable.

Las tres compuertas

TABLA 7.3 – RÉGIMEN DE INCORPORACIÓN POR COMPUERTAS

COMPUERTA	QUÉ SE DEMUESTRA	CÓMO SE VERIFICA
1 · Calificación	Que el sistema se comporta conforme al estándar de interoperabilidad en escenarios definidos.	Banco de pruebas automatizado y reproducible, con resultados entregables a la autoridad.
2 · Simulación de ecosistema	Que el sistema se comporta correctamente frente a otros actores y ante situaciones degradadas.	Ejercicio simulado con laboratorio de demostración y escenarios acordados con la autoridad.
3 · Operación supervisada	Que el sistema se comporta correctamente con tránsito real en volúmenes designados.	Operación experimental acotada, con reporte periódico y facultad de suspensión de la autoridad.

La secuencia de implementación

Existe un orden para construir capacidad UTM nacional que la experiencia internacional ha validado y que intentar alterar sale caro. Se enuncia aquí como recomendación técnica del programa.

- **1 · Registro.** Sin registro digital confiable de operadores, aeronaves y pilotos, ningún servicio posterior tiene a qué anclarse.
- **2 · Identificación.** Sin identificación remota operando, no hay dato de posición y la conformidad es imposible.
- **3 · Deconflicción estratégica.** Con registro e identificación, la autorización automatizada y la deconflicción previa son alcanzables.
- **4 · Operación más allá de la línea visual.** Solo tiene sentido habilitarla cuando las tres capas anteriores están operando y auditadas.
- **5 · Movilidad aérea avanzada.** Es el último escalón, y presupone todos los anteriores más la interfaz plena con la gestión de tránsito aéreo.

POR QUÉ EL ORDEN NO ES NEGOCIABLE

Cada escalón consume el producto del anterior. Habilitar operación más allá de la línea visual sin identificación remota operando y sin verificación de conformidad significa autorizar vuelos que nadie puede observar ni reconstruir.

La tentación política de saltar escalones —anunciar movilidad aérea avanzada antes de tener registro digital— es comprensible y es el error más caro que un país puede cometer en esta materia, porque produce compromisos públicos que la capacidad instalada no puede sostener.



FIGURA 17 Secuencia de habilitación operacional y compuertas de madurez.

Diez preguntas que siempre aparecen

Estas son, con variaciones menores de redacción, las preguntas que han surgido en todas las reuniones sostenidas durante 2026 con autoridad, operadores, academia y socios. Se responden aquí tal como se responderían en la mesa.

01 ¿El UTM le quita atribuciones a la autoridad aeronáutica?

No. El control de tránsito aéreo y la ayuda a la navegación aérea siguen siendo facultades de la autoridad. Lo que el UTM aporta son servicios accesorios — identificación, geo-conciencia, autorización digital, información de tránsito, conformidad y meteorología— que la autoridad define, habilita y supervisa. La autoridad gana capacidad de observación y de fiscalización; no pierde ninguna atribución.

02 ¿Se va a cobrar por volar?

El permiso de vuelo es una facultad del Estado y su tarifa, si existe, la fija el Estado. Un proveedor de servicios no cobra por el permiso: cobra por los servicios de valor agregado que presta al operador —planificación, evaluación automática de riesgo, evidencia de cumplimiento, integración con sus propios sistemas—. La operación recreativa básica no debería tener costo asociado al sistema.

03 ¿Esto significa que necesito equipamiento nuevo en mi dron?

Depende de su operación. Para las operaciones que la norma sectorial ya obliga a llevar identificación remota, el equipo es un requisito normativo, no una imposición del sistema. Muchas aeronaves modernas lo incorporan de fábrica; para las que no, existen módulos externos de bajo costo. Para la operación básica en línea visual directa, el sistema funciona con la declaración del operador.

04 ¿Un sistema UTM puede detectar drones ilegales?

La identificación remota solo identifica a quien coopera, igual que la matrícula solo identifica al vehículo que la lleva. Detectar tránsito no cooperativo es un problema distinto, que requiere sensores de presencia en radiofrecuencia y, eventualmente, sensores ópticos o acústicos, con un costo y una complejidad regulatoria propios. Prometer lo contrario es un error técnico.

05 ¿Qué pasa si se cae internet o el sistema?

Es una pregunta correcta y la respuesta debe ser explícita. La identificación difundida localmente funciona sin conectividad; la red de sensores puede seguir registrando. Los procedimientos de contingencia deben estar definidos en el concepto de operaciones y aprobados: qué operaciones continúan, cuáles se suspenden y cómo se reanuda el servicio. Un sistema sin modo degradado documentado no es certificable.

06 ¿Por qué no basta con el sistema de autorizaciones que ya existe?

Porque resuelve una función distinta. El sistema de autorizaciones gestiona el expediente: quién pidió, qué se le concedió y por cuánto tiempo. Lo que falta es la capa que registra el hecho: si voló, cuándo, por dónde y si se mantuvo dentro de lo autorizado. Sin esa capa no hay fiscalización, no hay investigación posible y no hay dato para calibrar la norma.

07 ¿Esto sirve para operaciones más allá de la línea visual directa?

Es, de hecho, su condición habilitante. Ninguna autoridad razonable autoriza operación rutinaria fuera del alcance visual sin identificación en vuelo, sin verificación de conformidad y sin registro reconstruible. El UTM es la infraestructura que hace defendible esa autorización; sin él, cada operación de ese tipo tiene que justificarse individualmente.

08 ¿Y la movilidad aérea avanzada, el transporte de pasajeros?

Es el escalón siguiente y presupone todos los anteriores, más la interfaz plena con la gestión de tránsito aéreo convencional y una infraestructura de superficie que hoy no existe. Anunciarla antes de tener registro digital, identificación y deconflicción operando es el error de comunicación más costoso que un país puede cometer en esta materia.

09 ¿Quién responde si ocurre un accidente?

La responsabilidad del vuelo es del operador y de su piloto al mando; ningún sistema la traslada. El proveedor de servicios responde por la correcta prestación de los servicios que tiene habilitados, en los términos de esa habilitación, y debe tener sistema de gestión de la seguridad operacional, matriz de riesgos y plan de emergencias. La autoridad conserva la supervisión y la facultad de suspender.

10 ¿Cuánto tarda un país en tener esto operando?

La tecnología no es el factor limitante: los componentes existen, están estandarizados y son adoptables. Lo que determina el plazo es la decisión institucional de abrir un régimen de operación experimental supervisada y la disciplina para recorrer las compuertas de calificación, simulación y operación real. Con voluntad regulatoria, es un horizonte de meses; sin ella, no hay horizonte.

CIERRE · ANTES DE LAS CONCLUSIONES

Qué significa esto para usted

La edición está dirigida a cuatro perfiles de lector. Antes de las conclusiones generales, resumimos qué aporta el documento a cada uno.

Para la autoridad aeronáutica

Lo que está en juego es capacidad de observación, no cesión de atribuciones.

- Gana **imagen del tránsito no tripulado** en la franja donde hoy no la tiene, y la gana sin desplegar infraestructura propia ni aumentar dotación.
- Gana **trazabilidad aguas abajo del permiso**: quién voló, cuándo, dónde y si se mantuvo dentro de lo autorizado, en formato reconstruible ante un incidente.
- Gana **dato para regular**: el volumen real de operación, la distribución geográfica y los patrones de desviación son los insumos que hoy faltan para calibrar la norma sobre evidencia.
- Conserva **todas sus facultades**: designa los volúmenes, fija las reglas, habilita y supervisa, y mantiene la potestad de suspender la habilitación.
- Lo que se le pide no es una certificación completa, sino **abrir un régimen de operación experimental supervisada** con compuertas definidas y facultad de corte.

Para el operador UAS

Lo que cambia es el costo de demostrar que su operación es segura.

- Deja de estimar a mano si puede volar: el sistema le entrega **el techo disponible celda por celda** sobre su área de trabajo.
- Deja de encargar un análisis de riesgo por cada misión: **la evaluación se calcula sobre su geometría declarada** y se puede iterar en el momento de planificar.
- Deja de construir su bitácora a posteriori: **el registro de la operación es un subproducto automático** del propio vuelo.
- Gana un argumento frente a su mandante y frente a su aseguradora: evidencia digital verificable de que operó dentro de lo autorizado.
- Lo que se le pide es **declarar su intención antes de volar** y llevar identificación remota cuando la norma lo exija. Nada más.

Para la academia y la formación

Se abre un campo de enseñanza que hoy no tiene programa en la región.

- La operación de una capa UTM exige perfiles que no existen: **supervisor de tránsito no tripulado**, analista de conformidad, especialista en datos aeronáuticos de baja cota.

- Los estándares son públicos y las implementaciones de referencia son abiertas: **es posible enseñar sobre el sistema real**, no sobre una descripción de él.
- Hay materia de investigación aplicada inmediata: fusión de fuentes de vigilancia heterogéneas, automatización de la evaluación de riesgo, calidad de dato de obstáculos en baja cota, modelos de prioridad entre operaciones.
- La formación es, además, el mecanismo más eficaz de transferencia: un país que forma a los supervisores de su propio sistema no depende del proveedor que se lo vendió.

Para el socio estratégico y el inversionista

El activo no es la plataforma: es la posición en la capa de servicios.

- La tecnología del UTM está estandarizada y es replicable; **la barrera de entrada real es regulatoria y relacional**, y se construye con años de trabajo con la autoridad.
- El programa tiene cinco líneas de actividad diferenciadas: plataforma para el Estado, servicios al operador, componentes de identificación, consultoría regulatoria y formación. Ninguna depende exclusivamente de las otras.
- La escala natural no es nacional: los marcos normativos de la región convergen hacia los mismos estándares, lo que hace que **la segunda implementación cueste una fracción de la primera**.
- El riesgo dominante no es técnico ni comercial: es **el ritmo regulatorio**, y es el único que ningún equipo controla por completo. Cualquier evaluación honesta del programa debe partir por ahí.

08

CAPÍTULO OCHO

Ocho tesis para el cielo bajo



Cierre de la edición. Las ocho afirmaciones que el programa CÓNDOR sostiene y que está dispuesto a defender, corregir o abandonar frente a mejor argumento.

- Lo que sostenemos hoy
- Lo que revisaremos cuando la evidencia lo exija

01

02

03

04

05

06

07

08

CAPÍTULO 08

Ocho tesis

Las ocho tesis siguientes condensan esta edición. Se presentan como posiciones de trabajo, no como conclusiones académicas: reflejan lo que el programa sostiene hoy y quedarán abiertas a revisión cuando la evidencia lo exija.

01 La baja cota es otro espacio aéreo, no un rincón del que ya existe.

Bajo los ciento veinte metros cambian la densidad de obstáculos, la naturaleza del riesgo dominante y la escala del tránsito. Un dominio con física distinta exige un sistema distinto, no una versión reducida del que ya tenemos.

02 El problema del dron no es de tamaño: es de visibilidad institucional.

El Estado chileno gestiona con solvencia el expediente de autorización. Lo que no tiene es la capa digital que conecta ese permiso con el hecho aeronáutico. Sin ella no hay fiscalización, no hay investigación posible y no hay dato para regular sobre evidencia.

03 El UTM no es control de tránsito aéreo para drones.

Es un sistema estratégico, centrado en el operador y automatizado, donde la mayor parte de las decisiones se toman antes del despegue y el rol humano se concentra en la excepción. Confundir los paradigmas produce sistemas que no escalan y modelos que no se sostienen.

04 La Operación 4D es el objeto que ordena todo lo demás.

Un volumen declarado en espacio y tiempo, con estado y ciclo de vida, es lo que convierte un formulario en un sistema. Todos los servicios U-space son funciones que operan sobre ese objeto.

05 Sin identificación remota no hay nada.

Es la condición previa de la conformidad, de la fiscalización y de la convivencia con la aviación tripulada. Su recepción es estrictamente pasiva y no plantea el conflicto jurídico que a veces se le atribuye. Pero solo identifica a quien coopera, y decir lo contrario destruye credibilidad técnica.

06 El mismo dato protege y se vende.

La geometría de obstáculos que protege a la aviación tripulada es la que le dice al operador hasta qué altura puede volar. La capa de protección justifica el sistema ante la autoridad; la capa de digitalización es lo que el mercado paga. Construir una vez, servir a dos destinatarios.

07 Declarar la brecha es lo que hace creíble al sistema.

Diecisiete elementos conformes, once parciales y cinco faltantes. Publicarlo no debilita la posición: la fortalece. En aviación, la credibilidad se construye al revés que en el marketing, declarando lo que falta antes de que lo encuentre el auditor.

08 La ruta crítica es regulatoria, y el orden no se negocia.

Registro, identificación, deconflicción, operación más allá de la línea visual, movilidad aérea avanzada. Cada escalón consume el producto del anterior. Y la figura que Chile no tiene —la del proveedor de servicios habilitado— es la que hay que construir con la autoridad, no contra ella.

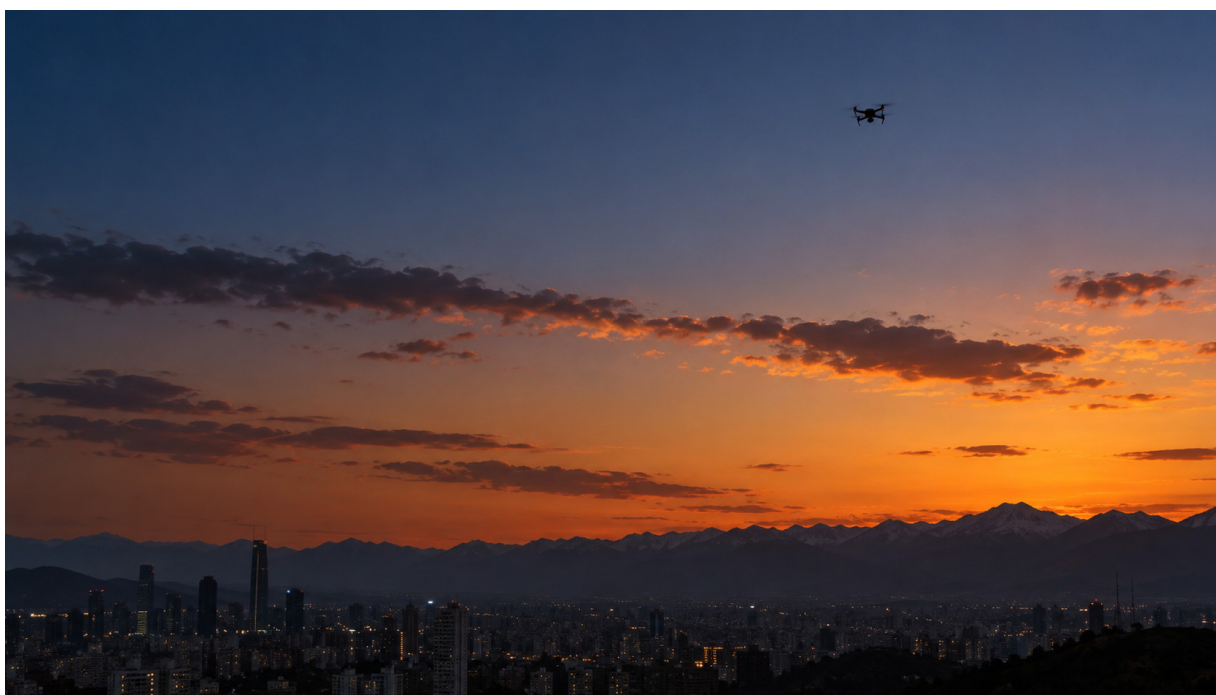


FIGURA 18 Imagen editorial de cierre: operación UAS en baja cota.

Falta trabajo, falta norma y falta que la conversación entre industria y autoridad deje de ser una secuencia de oficios y se convierta en ingeniería conjunta. Pero el cielo bajo ya está ocupado.

—Cierre de la Edición V.01

Referencias y bibliografía

Las referencias se agrupan por función y no por orden alfabético, para que sirvan como mapa de lectura y no solo como respaldo. En cada caso, la versión autoritativa es la publicada por el organismo emisor; esta edición no reproduce texto normativo.

MARCO CONCEPTUAL INTERNACIONAL

- Organización de Aviación Civil Internacional. «Unmanned Aircraft Systems Traffic Management (UTM) — A Common Framework with Core Principles for Global Harmonization», Edición 4.
- Organización de Aviación Civil Internacional. Doc 10019 — Manual sobre sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS).
- Organización de Aviación Civil Internacional. Doc 10039 — Manual sobre la provisión de servicios meteorológicos.

MARCO REGULATORIO EUROPEO

- Reglamento de Ejecución (UE) 2021/664 de la Comisión, de 22 de abril de 2021, relativo a un marco regulador para el U-space.
- Reglamento de Ejecución (UE) 2021/665 y Reglamento de Ejecución (UE) 2021/666 (paquete U-space).
- Agencia de la Unión Europea para la Seguridad Aérea (EASA). Medios aceptables de cumplimiento y material guía del Reglamento U-space; Easy Access Rules for U-space.
- Reglamento Delegado (UE) 2019/945 y Reglamento de Ejecución (UE) 2019/947, sobre sistemas de aeronaves no tripuladas y sus operaciones.

ESTÁNDARES DE CONSENSO E INTEROPERABILIDAD

- ASTM F3411 — Standard Specification for Remote ID and Tracking.
- ASTM F3548 — Standard Specification for UAS Traffic Management (UTM) UAS Service Supplier (USS) Interoperability.
- InterUSS Platform (Linux Foundation) — implementación de referencia del Discovery and Synchronization Service (DSS) y banco de calificación automatizada.
- ISO 23629 — UAS traffic management (UTM): terminología, requisitos de servicio y arquitectura de sistema.
- EUROCONTROL — Especificaciones ASTERIX para intercambio de datos de vigilancia.
- EUROCAE ED-269 — Minimum Operational Performance Standard for Geo-fencing.

METODOLOGÍA DE EVALUACIÓN DE RIESGO

- JARUS. «Guidelines on Specific Operations Risk Assessment (SORA)», Edición 2.5, y sus anexos.
- JARUS. SORA v2.5 — Explanatory Note (JAR_DOC_32).
- EASA — Guía de implementación de SORA 2.5 en el marco de la categoría específica.

MARCO NORMATIVO CHILENO

- Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. DAN 151 — Operaciones de sistemas de aeronaves pilotadas a distancia (RPAS), en su edición vigente.
- Dirección General de Aeronáutica Civil de Chile. DAN 91 — Reglas del aire y de operación general.
- Código Aeronáutico de Chile.
- Publicación de Información Aeronáutica (AIP) de Chile — secciones ENR 4.1 y ENR 5.1.

- Ley N° 19.880, que establece bases de los procedimientos administrativos.

PRÁCTICA INTERNACIONAL Y PRECEDENTES

- US UTM Implementation — especificación de definición de servicios, matriz de trazabilidad de requisitos y acuerdo de gobernanza del ecosistema de espacio aéreo compartido (documentación pública).
- Federal Aviation Administration — marco de aceptación de servicios de terceros y proceso regulatorio de operaciones más allá de la línea visual directa.
- SESAR Joint Undertaking — proyectos de demostración U-space y material de implementación.

FUENTES DE DATOS GEOESPACIALES EMPLEADAS

- Publicación de Información Aeronáutica de Chile — zonas, aeródromos y helipuertos.
- Sistema Nacional de Áreas Silvestres Protegidas del Estado — capa de áreas protegidas.
- OpenStreetMap y servicios derivados — obstáculos verticales, tendidos eléctricos e infraestructura sensible.
- Modelos digitales de elevación de cobertura global (Copernicus DEM / SRTM) — terreno.
- Mallas globales de asentamiento humano y densidad de población — insumo de riesgo terrestre.

NOTA SOBRE EL USO DE FUENTES

Las cifras de conjuntos de datos publicadas en el capítulo primero provienen de la base operativa del propio sistema y se declaran como tales. Las referencias normativas se citan como marco conceptual.

Esta edición **no cita ni atribuye información a proveedores tecnológicos específicos** ni reproduce material sujeto a licencia. Las arquitecturas descritas son desarrollo propio del programa, apoyadas en estándares públicos de consenso.

COLOFÓN

Compuesta en IBM Plex Sans, IBM Plex Serif, IBM Plex Sans Condensed e IBM Plex Mono sobre una retícula de rail interno de 34 mm y columna de lectura de 120 mm, con márgenes de 24 mm aptos para encuadernación a lomo pegado. Las portadillas y las páginas a sangre son composiciones vectoriales originales del programa, generadas sobre el sistema gráfico de la publicación: isolíneas de relieve, bandas de altura y llave de umbral de pista.

Santiago de Chile, septiembre de 2026.

PRÓXIMA EDICIÓN

V.02 — Del permiso al servicio: *cómo se opera un U-space*

Procedimientos, dotación, niveles de servicio, gestión de contingencias y la interfaz real entre una sala de supervisión UTM y una dependencia de control de tránsito aéreo.



CÓNDORUTM

CENAE · Centro de Navegación Aérea de Chile SpA · AOC N° 1626
Aeródromo Tobalaba (SCTB) · Hangar D-35 · Región Metropolitana · Chile

EDICIÓN V.01 · SEPTIEMBRE 2026