



AEVAH · AGENCIA ESPACIAL VALLE ALTO HENARES

TRANSMISIÓN DE IMAGEN EN TIEMPO REAL DESDE LA Sonda

Misión Estratosfera · Curso 2026/2027

CRA La Encina · CEIP Romualdo de Toledo · IES Valle del Henares
Mancomunidad Valle del Alto Henares · Guadalajara

15_TRANSMISION_IMAGEN_TIEMPO_REAL.md

TRANSMISIÓN DE IMAGEN EN TIEMPO REAL DESDE LA SONDA

Estudio técnico para la Misión Estratosfera AEVAH

Investigación específica encargada por el comité técnico (mayo 2026). Pregunta: ¿es viable enviar **imágenes en directo** desde la cápsula AEVAH a tierra durante todo el vuelo, aunque sean de baja resolución? ¿Con qué tecnología demostrada? ¿A qué coste, masa y dentro de qué marco legal en España?

Respuesta corta: sí, con tecnología **operativa desde 2013** en la comunidad UKHAS, basada en el protocolo abierto **SSDV** (Slow-Scan Digital Video). Para AEVAH la opción óptima es **SSDV sobre LoRa en la banda 868 MHz ISM (sin licencia HAM)** con un módulo de **~85 g** y **~90 €**. Imágenes 640×480 cada ~90 s, recibidas en directo por la red global SondeHub y embebibles en aevah.eu/vuelo para prensa y familias. Si AEVAH suma un radioaficionado al proyecto, se puede subir a **434 MHz amateur** con resoluciones 1280×640 en ~70 s.

1. RESUMEN EJECUTIVO

Opción	Banda	Tasa útil	Imagen y tiempo	Licencia ES	Coste	Masa	Recomendación
A — SSDV LoRa 868 MHz ISM	868 MHz	~1,76 kbps	320×240 en 1,5-3 min · 640×480 en 3-6 min	Sin HAM (≤25 mW PRA)	~90 €	~85 g	PRIMERA opción AEVAH
B — SSDV LoRa 434 MHz amateur "Mode 4"	434 MHz	~8,2 kbps efectivos	320×240 en 30-60 s · 1280×640 en ~70 s	HAM con indicativo EA	~95 €	~85 g	Si hay radioaficionado en el equipo
C — SSDV RTTY 300 baud	434 MHz	~270 bps	320×240 en 5-8 min	HAM con indicativo EA	~70 €	~50 g	Solo si presupuesto muy ajustado
D — Wenet FSK 96 kbps + LDPC	443,5 MHz	~96 kbps	1920×1440 en 3-5 s	HAM con indicativo EA	~150 €	~120 g	"Estado del arte"; excede AEVAH
E — APRS imagen	144,8 MHz	<1 kbps útil	>10 min con pérdidas	HAM	—	—	No recomendado

Decisión recomendada al comité: integrar **opción A** (LoRa 868 MHz ISM sin licencia) como base, con plan de subir a **opción B** si el proyecto confirma operador HAM antes de D-180. Grabar siempre en alta resolución a tarjeta microSD a bordo; el enlace de radio es para "verlo en directo", el material científico viaja en la tarjeta y se recupera con la cápsula.

2. SSDV — EL PROTOCOLO QUE LO HACE POSIBLE

SSDV (Slow-Scan Digital Video) fue creado por **Philip Heron (fsphil, MIOVIM)** dentro de la comunidad **UKHAS** (UK High Altitude Society) en 2012. Es un derivado paquetizado de SSTV adaptado a enlaces de radio digitales lentos: fragmenta una **imagen JPEG estándar** (cualquier cámara, sin requisitos especiales) en paquetes de tamaño fijo con corrección de errores, y los transmite por radio.

2.1 Estructura exacta del paquete SSDV (256 bytes)

Offset	Campo	Tamaño	Contenido
0	Sync	1 B	0x55
1	Tipo	1 B	0x66 (con FEC) / 0x67 (sin FEC)
2-5	Indicativo	4 B	Base-40, hasta 6 caracteres
6	Image ID	1 B	Identificador de imagen
7-8	Packet ID	2 B	Número de paquete dentro de la imagen
9-10	Width/Height	2 B	Dimensiones en bloques MCU (píx/16)
11	Flags	1 B	Calidad JPEG, EOI, submuestreo
12-14	MCU offset/index	3 B	Posición del bloque en la imagen
15-219	Payload	205 B	JPEG fragmentado
220-223	CRC	4 B	CRC-32
224-255	FEC Reed-Solomon	32 B	RS(255,223) — corrige hasta 16 B erróneos

Implicación práctica: si la radio pierde algunos bytes (típico en caída de paracaídas, rotación, ruido), Reed-Solomon los recupera. Si se pierde un paquete entero, su área en la imagen queda como una "banda gris" del último coeficiente DC — la imagen sigue siendo útil.

2.2 La red de recepción colaborativa

Los paquetes SSDV no necesitan llegar todos a la **misma** estación receptora. Cada receptor sube lo que decodifica al servidor central `ssdv.habhub.org` y el servidor **ensambla la imagen** combinando los paquetes de **todas las estaciones receptoras**. Si una estación en Sigüenza pierde el paquete 12 pero otra estación en Toledo lo recibe, la imagen se completa.

Para AEVAH esto es decisivo: no hace falta una antena perfecta en Cogolludo. La red SondeHub tiene receptores activos en **toda España** (Madrid, Barcelona, Sevilla, Valencia, etc.) que reportarán los paquetes que reciban sin coordinarse con el equipo lanzador.

2.3 Timings reales medidos (no estimados)

SSDV en RTTY a 300 baud (con 11 bits por byte: 1 start + 8 datos + 2 stop): **9,39 segundos por paquete** de 256 B. Una imagen JPEG de ~10 KB ocupa ~40 paquetes → **~6 minutos por imagen**.

Verificado en **TT7HAB**.
AEVAH en la Estratosfera — Expediente del proyecto · documento de difusión (datos marcados "pendiente de validación oficial" donde corresponde)

SSDV en LoRa Mode 4 (SF6 / BW 250 kHz / CR 4:5): **17 738 bps brutos, ~8,2-8,5 kbps efectivos**. Una imagen JPEG de 54,9 KB tarda **52 s**; una de 186,6 KB tarda **2 min 55 s**. Verificado en banco por TT7HAB.

3. CASOS REALES DOCUMENTADOS

3.1 Daniel Estévez EA4GPZ — España, mayo 2019 ★ (caso ESPAÑOL)

Daniel Estévez (EA4GPZ), radioaficionado e investigador español de prestigio internacional, recibió un globo LoRa a **180 km horizontales y ~24 km de altitud** con **SF11/BW125 y solo 10 mW** en 434,5 MHz + **Yagi 7 elementos + FUNcube Dongle Pro+**. También recibió un canal TTN 868 MHz SF7 BW125 a 25 mW.

Lección crítica que dejó publicada: SF alto sin **TCXO de muy baja deriva** es inviable en HAB: la deriva térmica del transmisor entre +25 °C en suelo y -60 °C en estratosfera descuelga al receptor LoRa. **Por eso se prefiere SF6-SF8 con BW 125-250 kHz** para imagen en globos sonda.

Fuente: desteve.net/2019/05/receiving-a-lora-high-altitude-balloon/

3.2 Babbage Bear — Dave Akerman, Reino Unido, agosto 2013 ★

El **oso peluche Babbage** (mascota oficial del Raspberry Pi) recreó el salto de Felix Baumgartner: cayó en paracaídas desde **39 000 m** transmitiendo posición y stills SSDV durante todo el vuelo. Hardware: Raspberry Pi + Pi Camera + placa **Pi In The Sky (PITS)** + módulo NTX2B en RTTY 300 baud. Presupuesto declarado: **~300 GBP** (~350 €). Fuente: raspberrypi.com/news/pi-in-the-sky-2/ + daveakerman.com.

3.3 UBSEDS25 — Universidad de Bristol, julio 2017

University of Bristol Spaceflight & Engineering Society lanzó UBSEDS25 con tracker propio: telemetría en **434,635 MHz Contestia 16/1000** e imagen en **434,6375 MHz RTTY 300 baud 8N2** subiendo en directo a ssdv.bristol-seds.co.uk. Vuelo previsto sureste hacia Francia. Fuente: amsat-uk.org/2017/06/28/ubseds25-balloon-ssdv/.

3.4 Project Horus / AREG — Australia, 2015-presente ★ (estado del arte)

Mark Jessop (VK5QI) y equipo en Adelaide desarrollaron **Wenet** ("The Swift One"), el sistema HAB más capaz que existe hoy: **FSK directo ~96 kbit/s con LDPC** (6 dB de ganancia de codificación), modulado por un RFM98W vía el periférico I2S de una Raspberry Pi en **443,5 MHz**. Resoluciones **1920×1440 en 3-5 segundos**. Sube a ssdv.habhub.org y amateur.sondehub.org. Es la **referencia técnica** de "hasta dónde se puede llegar". Excede las necesidades de AEVAH pero prueba el techo del estado del arte. Fuente: github.com/projecthorus/wenet.

3.5 Skycademy — Raspberry Pi Foundation, Reino Unido, desde 2015

>50 profesores británicos formados para volar globos con Raspberry Pi + PITS + SSDV. **>20 vuelos escolares** con imagen en directo entre 2015 y 2019. Modelo de **formación de formadores** que multiplica los lanzamientos sin recursos centrales. Fuente: raspberrypi.org/blog/skycademy-balloons-everywhere/.

3.6 RS41ng + radiosondas reutilizadas — Mikael Nousiainen OH3BHX, 2022-

RS41ng es un firmware abierto que reflasha las radiosondas meteorológicas Vaisala RS41 (las que sueltan AEMET y los servicios meteo europeos) para reconvertirlas en trackers HAM en APRS, Horus 4FSK v2/v3,

AEVAH - Misión Estratosfera — Expediente del proyecto - documento de difusión (datos marcados "pendiente de validación oficial" donde corresponde)

CW, WSPR y FT8 en 70 cm. La radiosonda recuperada **es gratis** (basta cazarla con un RTL-SDR siguiendo SondeHub) y el firmware libre. **Limitación importante:** el MCU de la RS41 **no incluye SSDV** (memoria insuficiente). Útil como tracker barato, no como sistema de imagen. Fuente:

github.com/mikaelnousiainen/RS41ng .

3.7 OH3HAB 7 — Finlandia, septiembre 2023

Vuelo comunitario en RS41 reflasheado con tracking colaborativo internacional y aterrizaje filmado en un río. Demuestra que la red de seguimiento funciona en directo a escala internacional. Fuente:

0xfeed.tech/2023/09/making-tracking-of-the-high-altitude-balloon-flight-oh3hab-7-a-community-effort .

3.8 Pi In The Sky (PITS) — Dave Akerman + Anthony Stirk, desde 2014

Placa HAB de telemetría e imagen para Raspberry Pi, **hardware y software open source**. Soporta RTTY, LoRa (vía complemento Stirk), APRS. GPS uBlox aprobado **hasta 50 km de altitud**. Autonomía declarada >20 h con 4 pilas AA. Decenas de lanzamientos escolares y amateurs documentados en daveakerman.com .

Código: github.com/PiInTheSky/pits .

4. TABLA COMPARATIVA EXHAUSTIVA

Tecnología	Banda	Tasa útil	Imagen 320×240 (~10 KB)	FEC	Tx	Rx	Licencia ES	Madurez
SSDV RTTY 50 baud	434 MHz amateur	~45 bps	~30-40 min	RS(255, 223) opc.	NTX2 B/MT X2	RTL- SDR + dl-fldigi	HAM (EA)	Histórica
SSDV RTTY 300 baud	434 MHz amateur	~270 bps	~ 5-8 min	RS(255, 223) opc.	NTX2 B/MT X2	RTL- SDR + dl-fldigi	HAM (EA)	Estándar clásico
SSDV RTTY 600 baud	434 MHz amateur	~545 bps	~2,5-4 min	RS(255, 223) opc.	MTX2	RTL- SDR + dl-fldigi	HAM (EA)	UBSEDS25
SSDV LoRa Mode 4 (SF6/BW250/CR4:5)	434 MHz amateur	~ 8,2 kbps efectivo	30-60 s	LoRa CR + RS opc.	RFM9 8W	RTL- SDR / lora- gateway	HAM (EA)	Akerman, estándar moderno
SSDV LoRa SF8/BW125/CR4:5	868 MHz ISM	~1,76 kbps	~1,5-3 min	LoRa CR	RFM9 5W	RTL- SDR / SDR#	SIN licencia (≤25 mW PRA)	Estévez 2019
Wenet (FSK 96 kbps + LDPC)	443,5 MHz amateur	~96 kbps	~1 s (y 1920×1440 en 3-5 s)	LDPC, 6 dB ganancia	RFM9 8W FSK I2S	RTL- SDR + GNU Radio	HAM (EA)	Project Horus, alta gama
APRS imagen (AX.25 1200 baud)	144,8 MHz amateur	<1 kbps útil	>10 min con pérdidas	Ninguna	TNC + VHF	TNC / direwolf	HAM (EA)	No recomendado
Wi-Fi/4G LTE	2,4 GHz / celular	Mbps	N/A	—	ESP32-CAM	—	Libre	Solo <1-5 km altitud

5. CÓMO IMPLEMENTARLO EN AEVAH

5.1 Opción A — 868 MHz ISM sin licencia HAM (recomendada para AEVAH)

Componente	Modelo concreto	Masa	Coste
Ordenador a bordo	Raspberry Pi Zero 2 W + microSD A1 16 GB	~12 g	26 €
Cámara	Pi Camera Module v3 (12 MP, sensor IMX708)	~4 g	30 €
Radio	Módulo LoRa RFM95W 868 MHz (Semtech SX1276) + breakout	~3 g	12 €
Antena	1/4 λ vertical DIY (~8,2 cm + 4 radiales de hilo rígido)	~5 g	<1 €
Energía	Pack 2× AA Energizer Ultimate Lithium L91 + step-up	~30 g	10 €
Sensor ambiental	BME280 (T+P+RH), reaprovecha el del datalogger	0 g extra	0 € extra
Cableado + caja EPS interna	—	~30 g	10 €
TOTAL subsistema imagen+telemetría a bordo		~85 g	~90 €
Receptor en tierra	RTL-SDR v4 + Yagi 70 cm DIY + Pi/portátil	(queda en tierra)	~70 €
TOTAL del despliegue		~85 g a bordo	~160 €

Configuración LoRa recomendada en 868 MHz ISM:

Frecuencia: 868,1-868,5 MHz (banda ISM 25 mW)
Modulación: LoRa CSS
Spreading Factor: SF8
Bandwidth: 125 kHz
Coding Rate: CR 4:5 (suficiente, balance velocidad/robustez)
Potencia: +14 dBm (≤25 mW PRA – cumple CNAF)
Payload máximo: 255 bytes
Imagen: 640×480 JPEG calidad 6 (~25-30 KB)
Tiempo por imagen: ~3 minutos
Cadencia: 1 imagen cada 4-5 minutos (deja margen telemetría)
Ciclo de servicio: ≤1 % (limitación banda 868 MHz)

Aunque la cadencia (~5 min/imagen) es más lenta que en 434 MHz amateur, sigue dando **decenas de imágenes durante el vuelo de 3 h**, sin requerir radioaficionado.

5.2 Opción B — 434 MHz amateur (si AEVAH tiene radioaficionado en el equipo)

Mismo hardware pero con **RFM98W 434 MHz** (Semtech SX1278). Permite **LoRa Mode 4** de Akerman (SF6 / BW 250 kHz / CR 4:5 → 8,2 kbps efectivos): imagen **640×480 en 30-60 s, 1280×640 en ~70 s**. El radioaficionado **firma la emisión con su indicativo EA**, notifica al URE Sección Guadalajara y al Servicio Provincial de Inspección de Telecomunicaciones, y **es legalmente el operador responsable durante todo el vuelo**.

5.3 Software (todo libre y open source)

- **Codificador SSDV** (compila la imagen JPEG a paquetes): github.com/fsphil/ssdv (Philip Heron, autor original).
- **Firmware embarcado:**
- Para Raspberry Pi: **PITS software** (github.com/PiInTheSky/pits) — incluye el integrador con SSDV.
- Para ESP32 (alternativa más ligera): librería **RadioLib** + ejemplos de SSDV-ESP32 del wiki UKHAS.
- **Receptor en tierra:**
- **lora-gateway** (Stirk/Akerman, github.com/PiInTheSky/lora-gateway) para LoRa: corre en una segunda Raspberry Pi con un RFM98W idéntico al de a bordo, decodifica y **sube automáticamente a SondeHub** + ssdv.habhub.org .
- **dl-fldigi** (UKHAS) para RTTY.
- **horus-gui** para telemetría Horus 4FSK.
- **Visualización en directo:**
- ssdv.habhub.org — galería de imágenes en vivo.
- amateur.sondehub.org — tracker con traza GPS + imágenes.
- aevah.eu/vuelo (a crear) — embeber un `<iframe>` el día D para que prensa, familias y centros vean las imágenes en directo sin instalar nada.

5.4 Protocolo de telemetría conjunto: Horus Binary v2/v3

Independiente de SSDV, recomendamos transmitir **telemetría continua** con **Horus Binary v2/v3** (Project Horus): paquetes binarios de 32 B cada 5 s con LDPC, decodificables por horus-gui y subidos a amateur.sondehub.org . Da posición, altitud y batería en tiempo real, **independientemente de las imágenes**. Es el estándar de telemetría amateur en HAB moderno.

5.5 Recomendación operativa siempre presente

Grabar SIEMPRE en paralelo a la microSD a bordo en alta resolución (foto 12 MP + vídeo 1080p si la Pi Camera lo soporta). El downlink de radio es la **vista en directo** (para prensa, didáctica, eco mediático); el **material científico real** viaja en la tarjeta y se recupera con la cápsula al aterrizar. No depender del enlace para el resultado final.

6. LEGALIDAD EN ESPAÑA (cumplir en serio)

- **433,05-434,79 MHz banda ISM** (Nota UN del CNAF): permitida **sin licencia con ≤ 10 mW PRA** y ciclo de servicio típicamente ≤ 10 %. **10 mW es muy poco** para 30 km de altitud + 150 km de deriva.
- **430-440 MHz banda amateur (70 cm):** atribución primaria en España, 300 W máximo (limitado en la práctica por la electrónica). **Requiere indicativo EA**. La Orden ITC/1791/2006 no prohíbe explícitamente la emisión aerotransportada, pero la práctica habitual es **notificar al Ministerio (Secretaría de Estado de Telecomunicaciones)** el lanzamiento con NOTAM previo (AESA) e indicativo del operador responsable. **Consultar al Servicio Provincial de**

AEVAH · Misión Estratostera — Expediente del proyecto · documento de difusión (datos marcados "pendiente de validación oficial" donde corresponde)

Inspección de Telecomunicaciones de Guadalajara y al URE Sección Guadalajara antes del vuelo (*sin confirmar al momento; ver §10 fuentes BOE*).

- **868,7-869,2 MHz banda ISM (LoRa): 25 mW PRA máx, sin licencia**, ciclo de servicio normalmente $\leq 1\%$. **Compatible con uso aerotransportado civil**. Es la vía **sin HAM más limpia** para AEVAH.
- **144,800 MHz APRS**: banda amateur, **requiere HAM**. Velocidades insuficientes para imagen (ver tabla §4). No usar para foto, solo para telemetría de posición si se elige.
- **AESA (Agencia Estatal de Seguridad Aérea)**: el globo en sí, independientemente de la radio, requiere **NOTAM** y notificación previa para masas > 2 kg. La cápsula AEVAH (< 2 kg) está justo en el umbral; **revisar el RD 1180/2018 y la Circular AESA vigente** (*ver doc 02_MARCO_NORMATIVO_Y_PROCEDIMIENTO_AESA.md*).

7. COSTE Y MASA — RESUMEN PARA AEVAH

Concepto	Masa	Coste
Subsistema imagen a bordo (Pi Zero 2 W + Pi Cam v3 + RFM95W + antena + pilas)	~85 g	~90 €
Receptor en tierra (RTL-SDR v4 + Yagi 70 cm + Pi)	(queda en tierra)	~70 €
TOTAL despliegue completo (a bordo + tierra)	~85 g a bordo	~160 €

Encaje en el presupuesto AEVAH:

- MV honesto del proyecto: **1 957 €**. La inversión de 160 € es **$< 10\%$ del MV** y **liberable** del propio MV (no requiere cofinanciación extra).
- Margen másico de la cápsula tras la integración: **~485 g libres** de los 570 g previstos para experimentos (ver 11_CATALOGO §XI.2). **No hay que eliminar ningún experimento existente**.
- Energía: $2 \times$ AA Energizer Lithium L91 dedicados dan $\sim 3\,000$ mAh a -40°C ; consumo del subsistema ~ 150 mA $\rightarrow$ autonomía ~ 20 h, margen $\times 6$ sobre el vuelo.

8. INTEGRACIÓN PEDAGÓGICA

La transmisión de imagen en directo no es solo una mejora técnica: abre **tres productos educativos nuevos sin añadir experimentos**.

8.1 Pantalla en directo en el acto del lanzamiento

Un proyector en el campo de lanzamiento muestra aevah.eu/vuelo (que embebe ssdv.habhub.org/?call=AEVAH-1). Las familias, ayuntamientos, prensa y alumnado ven el vuelo **en tiempo real, sin intermediarios**.

8.2 Análisis en directo durante el ascenso

Bachillerato ejecuta [bach-radio-horizonte](#) y [eso-curvatura-timelapse](#) sobre las imágenes que van llegando, **mientras el globo aún vuela**. El alumnado discute ciencia mientras la ciencia ocurre.

AEVAH · Misión Estratosfera — Expediente del proyecto · documento de difusión (datos marcados “pendiente de validación oficial” donde corresponde)

8.3 Conexión real con la comunidad HAB internacional

Al subir a SondeHub, otros radioaficionados y entusiastas HAB de Europa reciben las imágenes y la traza. La misión queda **integrada en una red científica global activa**. Se suma directamente al experimento existente **trans-tracking-ciudadano** ("La comunidad caza la baliza"): ahora la comunidad también caza las imágenes.

9. RECOMENDACIÓN FINAL Y PRÓXIMOS PASOS

9.1 Opción ganadora

SSDV sobre LoRa en 868 MHz ISM (sin licencia HAM), con **Raspberry Pi Zero 2 W + Pi Camera v3 + módulo RFM95W** (Semtech SX1276), configuración **SF8 / BW 125 kHz / CR 4:5 / 14 dBm (≤ 25 mW PRA)**, imagen **640×480 JPEG cada ~3-5 min** + telemetría Horus Binary v2.

9.2 Por qué esa opción

1. **No exige licencia HAM** → quita un bloqueo regulatorio crítico en un proyecto escolar con menores y centros públicos.
2. **Demostrado en España** por Daniel Estévez EA4GPZ (caso §3.1).
3. **Software 100 % libre y mantenido** (Phil Heron, Stirk/Akerman, Project Horus, RS41ng).
4. **Coste y masa muy holgados** (90 € y 85 g) → libera presupuesto y carga útil para los experimentos científicos.
5. **Resultado pedagógico y mediático inmediato**: el día D los niños ven "su" globo desde el aula y la prensa puede transmitir el vuelo en directo desde aevah.eu/vuelo.
6. **Plan B integrado**: grabar siempre en alta resolución a microSD; el material bueno se recupera al aterrizar.

9.3 Opción potenciada si AEVAH suma radioaficionado al equipo

Migrar a **434 MHz amateur con LoRa Mode 4** de Akerman: SF6 / BW 250 kHz / CR 4:5 → 8,2 kbps efectivos → **1280×640 en ~70 s**. El indicativo EA del operador firma la emisión. Esta es la configuración usada por Pi In The Sky, Project Horus (versión clásica) y la mayoría de vuelos UKHAS desde 2015. Mismo hardware base, solo cambia el módulo (RFM98W vs RFM95W) y la configuración del firmware.

9.4 Hitos para el cronograma del proyecto

Fecha	Tarea
2026-09	Pedido del hardware (Pi Zero 2 W + Pi Cam v3 + RFM95W + RTL-SDR v4).
2026-11	Montaje y test en aula (taller intercentros con docente de Tecnología).
2026-12	Test de transmisión a 5 km desde un municipio a otro del proyecto.
2027-03	Test largo alcance a ~30 km con globo cautivo o desde un alto. Reporte a SondeHub.
2027-04	Test final D-15 con todo el equipo + receptor en tierra.
2027-05	AEVAH: Misión Estratosfera — Expediente del proyecto - documento de difusión (datos marcados "pendiente de validación oficial" donde corresponde) Vuelo: imágenes en directo en aevah.eu/vuelo durante todo el vuelo.

9.5 Pendientes de verificación (añadir a 00_PENDIENTES_VERIFICAR.md)

- Trámite administrativo concreto **AESA/AER** para emisión radio aerotransportada desde HAB en España (consulta a Servicio Provincial de Inspección de Telecomunicaciones de Guadalajara).
- Precio actual del **kit PITS** (Uputronics) por si se opta por la opción B con radioaficionado.
- Existencia de **radioaficionado colaborador** en el Valle del Alto Henares (URE Sección Guadalajara, ver §2.3 del documento de pendientes).

10. FUENTES VERIFICABLES

Protocolos y especificaciones

- UKHAS Wiki — SSDV guide: <https://ukhas.org.uk/doku.php?id=guides:ssdv>
- TT7HAB — SSDV Slow Scan Digital Video (estructura, RS, timings): <http://tt7hab.blogspot.com/2017/03/ssdv-slow-scan-digital-video.html>
- TT7HAB — The LoRa SSDV (Modes 0-9, tasas reales): <http://tt7hab.blogspot.com/2018/04/the-lora-ssdv.html>
- Codificador SSDV original (Phil Heron MIOVIM): <https://github.com/fsphil/ssdv>
- Servidor SSDV en directo: <https://ssdv.habhub.org>

Hardware y firmware

- Pi In The Sky (PITS) — Dave Akerman + Anthony Stirk: <https://www.pi-in-the-sky.com> y <https://github.com/PiInTheSky/pits>
- Dave Akerman — Fast HAB Imaging (LoRa SSDV 1280×640 en 70 s): <https://www.daveakerman.com/?p=1913>
- Dave Akerman — Pi In The Sky Board A+/B+: <http://www.daveakerman.com/?p=1706>
- Dave Akerman — DIY Lightweight Pi Tracker with SSDV: <https://www.daveakerman.com/?p=2101>
- HopeRF RFM98W (SX1278) datasheet: <https://www.hoperf.com/modules/lora/RFM98.html>
- Uputronics store (HAB hardware): <https://store.uputronics.com/>
- Tienda Random Nerd Tutorials — ESP32-CAM: <https://randomnerdtutorials.com/esp32-cam-ai-thinker-pinout/>

Casos reales

- Raspberry Pi Foundation — Pi in the Sky 2 (Babbage Bear): <https://www.raspberrypi.com/news/pi-in-the-sky-2/>
- Skycademy — formación de profesorado británico: <https://www.raspberrypi.org/blog/skycademy-balloons-everywhere/>
- AMSAT-UK — UBSEDS25 SSDV (jul 2017): <https://amsat-uk.org/2017/06/28/ubseds25-balloon-ssdv/>
- Project Horus — Wenet (FSK 96 kbps + LDPC): <https://github.com/projecthorus/wenet>
- Project Horus — SondeHub Amateur Tracker wiki: <https://github.com/projecthorus/sondehub-amateur-tracker/wiki/Guide-for-HabHub-Users>
- SondeHub Tracker amateur HAB: <https://sondehub.org> y <https://amateur.sondehub.org>

Este es un sitio web de difusión de datos. Los datos en este sitio son de difusión (datos marcados "pendiente de validación oficial" donde corresponde).

- **Daniel Estévez EA4GPZ — Receiving a LoRa HAB (España, 180 km):** <https://destevez.net/2019/05/receiving-a-lora-high-altitude-balloon/>
- RS41ng — Mikael Nousiainen OH3BHX: <https://github.com/mikaelnousiainen/RS41ng>
- RTL-SDR.com — Reprogramando RS41 a APRS/RTTY/CW: <https://www.rtl-sdr.com/reprogramming-vaissala-rs-41-radiosondes-to-transmit-aprs-rtty-cw-in-the-ham-or-ism-bands/>
- oxfeed.tech — OH3HAB 7 (Finlandia 2023): <https://oxfeed.tech/2023/09/making-tracking-of-the-high-altitude-balloon-flight-oh3hab-7-a-community-effort.-watch-the-epic-landing-in-a-river/>
- Reid Klofas — Reprogramando RS41 para amateur (2024): <https://klofas.com/blog/2024/reprogramming-RS41-radiosonde-amateur-radio/>
- Project Horus / AREG flights: <https://www.aretg.org.au/archives/category/activities/project-horus>

Legalidad España

- URE — Bandas atribuidas (70 cm primary, 300 W, EA): <https://www.ure.es/bandas-atribuidas/>
- BOE-A-2006-10286 — Reglamento de uso del dominio radioeléctrico por aficionados: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2006-10286>
- BOE-A-2013-4845 — CNAF: <https://www.boe.es/buscar/act.php?id=BOE-A-2013-4845>
- Notas UN del CNAF (PDF): <https://avance.digital.gob.es/espectro/CNAF/notas-UN-2017.pdf>
- Telefónica Tech — 433 MHz y software libre (límites ISM España, Pte 2): <https://telefonicatech.com/blog/los-433-mhz-y-el-software-libre-parte-2>

Otras

- Wikipedia — AX.25 (por qué APRS no sirve para imagen): <https://en.wikipedia.org/wiki/AX.25>

Notas marcadas **(sin confirmar)** en el informe: trámite administrativo concreto AESA/AER para HAB en España, precio actual del kit PITS, y disponibilidad real de radioaficionado en el Valle del Alto Henares. Ver 00_PENDIENTES_VERIFICAR.md §2.3.

Documento elaborado en mayo 2026 por encargo del comité técnico AEVAH. La comunidad HAB evoluciona rápido; revisar ukhas.org.uk y sondehub.org para últimas novedades antes del lanzamiento de mayo 2027.

ANEXO A · OPCIONES AVANZADAS CON EXPERTO EN RF EN EL EQUIPO

Este anexo se añadió a petición del comité tras confirmar que el equipo cuenta con un **experto en radiofrecuencia y antenas**. Foco: lo que SOLO un radioaficionado experimentado puede aprovechar y enriquece la misión sin disparar el coste (presupuesto extra objetivo **~250-500 € sobre la base LoRa**). AEVAH · Misión Estratosfera — Expediente del proyecto · documento de difusión (datos marcados “pendiente de validación oficial” donde corresponde)

A.0 RESUMEN EJECUTIVO DEL ANEXO

El documento principal recomendaba SSDV sobre LoRa por simplicidad operativa. Con experto RF en el equipo, **la opción técnicamente óptima cambia a Wenet** (Project Horus / VK5QI): mismo módulo radio RFM98W pero modulado en **FSK directo a 96 kbit/s por el periférico I²S de la Raspberry Pi**, con LDPC para 6 dB de ganancia de codificación. **Una imagen full-HD (1920×1440 JPEG ~50 KB) en ~80 segundos a 50 mW.**

Combinado con **antena helicoidal axial RHCP a bordo** (elimina el *fading* de 20-30 dB causado por la rotación libre de la cápsula), **dual-band LoRa 434 + 868 MHz simultáneo** (redundancia ante deriva de TCXO o nulo de antena por banda), y **un módulo Iridium SBD (RockBLOCK 9603) como backup de última milla** para una foto garantizada incluso si toda la RF falla, AEVAH alcanza un nivel operativo equivalente a misiones universitarias internacionales.

Coste neto extra estimado total: ~430 € sobre el escenario MV (RockBLOCK 280 € + helicoidal DIY 25 € + módulo Wenet RFM98W extra 12 € + módulo LoRa 868 backup 12 € + SDR profesional SDRplay RSPdx 219 € si no se reutiliza el RTL-SDR existente; o ~210 € extra reciclando el SDR).

Lo que se descarta razonadamente: DATV en cualquier banda (masa de PA + consumo), banda 23 cm (**bloqueada por CEPT ECC Decision (25)01** desde diciembre 2025), HackRF One (peor MDS que Airspy/RSPdx en HAB), trackers AZ/EL sobredimensionados.

A.1 WENET (Project Horus / Mark Jessop VK5QI) — el motor principal

Wenet ("The Swift One") es el sistema HAB más capaz que existe hoy para imagen. Lo desarrolló Mark Jessop (VK5QI) en Project Horus, Adelaida, dentro del grupo AREG.

A.1.1 Innovación clave

No se usa el modulador LoRa interno del SX1278 (limitado a ~22 kbps en configuraciones útiles): la Pi entrega la forma de onda binaria **directamente al pin DIO2 del RFM98W vía el periférico I²S**, en **modo FSK gestionado por software**. Esto desbloquea **~96 kbit/s (115 ksymbol/s)** con el mismo chip de 12 €.

A.1.2 Modulación y FEC

- **Modulación:** FSK 2 niveles a 115 ksym/s.
- **FEC:** LDPC code 1/2 con **6 dB de ganancia de codificación** sobre FSK desnudo.
- **Ancho ocupado:** ~200 kHz → **no es legal en la sub-banda ISM 433 MHz** (ancho máximo permitido). Opera por convención de la comunidad amateur en **443,5 MHz** (banda 440-450 MHz amateur en España). **Exige indicativo válido EA a bordo.**
- **Potencia:** **50 mW** en RFM98W estándar (el radioaficionado puede elevar a ~100 mW con la versión RFM98W-100 sin coste extra).

A.1.3 Sensibilidad comparada (datos de Rowetel / sigidwiki)

Para 200 bps equivalentes normalizados:

Modo	MDS (dBm)	Ventaja vs RTTY 50 baud
RTTY 50 baud (dl-fldigi)	~-115	referencia
LoRa Mode 10 (~1 s/paquete)	-132	+17 dB
Horus Binary 4FSK v2	-143	+28 dB
Wenet FSK 96 kbit/s + LDPC	-112	+3 dB pero a 480× la velocidad

Lectura clave: Wenet sacrifica unos pocos dB de sensibilidad frente a Horus Binary, pero **transmite 1920×1440 entero en 80 s a 50 mW**. A esa cadencia, **100+ imágenes recuperadas** en 3 h de vuelo, frente a las ~30 de LoRa-SSDV Mode 4.

A.1.4 Hardware embarcado mínimo (recomendado AEVAH)

Componente	Modelo	Coste	Masa
Ordenador	Raspberry Pi Zero 2 W	18 €	~10 g
Cámara	Pi Camera HQ (sensor IMX477, 12 MP, óptica intercambiable) o Pi Camera v3 (IMX708)	60 € / 30 €	~10 g / 4 g
Radio Wenet	RFM98W 443,5 MHz (Semtech SX1278)	12 €	~3 g
Antena	Helicoidal axial RHCP (ver A.3.1)	25 € DIY	~50 g
TCXO sustituido	TCXO ±2 ppm para el RFM98W (crítico — ver A.1.5)	8 €	~1 g
Pilas dedicadas	2× AA Energizer Lithium L91 + step-up	10 €	~30 g
Tarjeta SD A1 16 GB (alta res a bordo)	SanDisk	8 €	~2 g
TOTAL Wenet a bordo		~141 € (con Pi Cam HQ) o ~111 € (Pi Cam v3)	~110 g

A.1.5 Lección crítica: TCXO obligatorio (caso EA4HCD/Estévez 2019)

Daniel Estévez (EA4GPZ) documentó en mayo 2019 el fallo de un vuelo HAB español (EA4HCD precursor de FossaSat-1): **el canal 434,5 MHz LoRa SF11 no decodificó por la deriva térmica del transmisor** entre +25 °C en suelo y -60 °C en estratosfera; **el canal 868 MHz LoRa SF7 sí fue recibido** porque cada chirp es más corto y tolera mejor el *drift*. La causa raíz: TCXO de calidad insuficiente.

Recomendación para el experto AEVAH: sustituir el oscilador del RFM98W por **TCXO ±2 ppm** (≤8 €) ANTES del primer test. Caracterizar con VNA la estabilidad de portadora entre +25 °C y -50 °C en cámara frigorífica del laboratorio. **Sin esto, Wenet (que es FSK ancho y más tolerante que LoRa SF altos) sigue funcionando, pero los 6 dB de margen LDPC se evaporan parcialmente.**

A.1.6 Recepción

- `wenet_rx` (Python, libcodec2): consume IQ del SDR (RTL-SDR vía `rtl_sdr` o directamente Airspy R2), demodula GFSK y aplica LDPC.
- **Mínimo:** RTL-SDR v3 + LNA modesto. **Mejor:** Airspy R2 / SDRplay RSPdx (≈3 dB extra de margen).
- **GUI pública:** `wenet.sondehub.org` muestra las imágenes según se ensamblan.

A.1.7 Casos

- Vuelos regulares Project Horus / AREG (Adelaida) desde 2015: Horus 42, 43, 50+. Mark Jessop VK5QI y David Rowe.
- OZQRP (Australia).
- En Europa los vuelos Wenet han sido más esporádicos pero el receptor está integrado en SondeHub-Amateur.

Fuentes: github.com/projecthorus/wenet , rowetel.com/?p=6225 , areg.org.au/archives/category/activities/project-horus , sigidwiki.com/wiki/Horus_Binary_4FSK_-_v2 .

A.2 HORUS BINARY 4FSK v2 — la mejor telemetría amateur

Independiente de Wenet, **Horus Binary v2/v3** es el formato de telemetría preferido por la comunidad HAB amateur moderna:

- **Paquete binario de 32 bytes** cada 5 s con LDPC.
- **MDS -143 dBm** (vs -132 de LoRa Mode 10, -115 de RTTY 50 baud).
- Decodificable por [horus-gui](#) (GUI multiplataforma del Project Horus).
- Sube automáticamente a amateur.sondehub.org .

Combinación recomendada para AEVAH: Horus Binary para telemetría (posición, altitud, batería, T_int, P) en un canal independiente + Wenet para imagen. Dos RFM98W en la misma Pi, dos antenas separadas, banda 70 cm amateur en frecuencias adyacentes (p. ej. Wenet en 443,500 y Horus Binary en 443,650).

Fuente: rowetel.com/?p=6225 .

A.3 ANTENAS AVANZADAS — el experto entra en juego

A.3.1 Helicoidal axial RHCP en la cápsula (LA OPCIÓN GANADORA)

Diseño documentado por Pavel Ondráček (TT7HAB), probado en vuelos reales:

Versión "grande" original (4 vueltas, 434 MHz): - Diámetro: **23,1 cm** - Paso (espaciado): **17,4 cm** - Reflector octogonal: **55 cm** de lado a lado - Longitud total tubo cobre 6 mm: ~70 cm (cable enrollado: ~300 cm) - Predicción NEC2: **11,7 dBi** en espacio libre, **15,9 dBi** a 1,3 m sobre suelo - Masa: ~270 g (excesiva para AEVAH)

Versión "compacta" recomendada para AEVAH (2 vueltas, 434 MHz): - Diámetro: 23 cm - Paso: 17 cm - Hilo de cobre **1 mm sobre soporte PVC ø50 mm** - Masa: ~50 g - Ganancia: **5-7 dBi** + RHCP pura

Por qué RHCP elimina el fading de rotación: la cápsula HAB rota libremente en su descenso por paracaídas (1-2 rpm). Un dipolo $\lambda/4$ vertical, combinado con la Yagi horizontal del receptor, sufre **nulos de 20-30 dB cuando se cruzan en 90°** (Ondráček mide directamente en vuelos; Akerman, Jessop y Estévez lo confirman). Con polarización circular RHCP a bordo, el receptor lineal solo sufre **3 dB de pérdida constante, sin variación temporal**. Si además se monta una Cross Yagi RHCP en tierra (ver A.3.3), la pérdida cruzada también desaparece.

A.3.2 Alternativa QFH (Cuadrifilar Helicoidal)

Más compacta que la helicoidal axial:

- Diseño del repo github.com/ODZ-UJF-AV-CR/QFH-Antenna : hilo de cobre 0,8 mm plateado, longitudes 357 mm y 339,4 mm para 433 MHz, soporte PVC ligero. **Masa <60 g.**
- **RHCP omnidireccional hacia el hemisferio inferior** — adecuado para HAB porque la dirección que mira a tierra es exactamente el hemisferio inferior.

A.3.3 Cross Yagi RHCP/LHCP en tierra con combinador 0/90°

Dos Yagis 9 elementos en el mismo *boom* giradas 90° (planos H y V), sumadas con un **híbrido de cuadratura tipo Wilkinson**. Permite recibir indistintamente RHCP o LHCP conmutando con relé el puerto de cuadratura.

- Coste DIY en aluminio: **~80-120 €.**
- Comercial: WiMo, M2 Antennas, InnovAntennas.
- Ganancia típica: 12-14 dBi.

A.3.4 LPDA 400-1000 MHz (alternativa multibanda)

Una log-periódica cubre **434 y 868 MHz simultáneamente** con ~7 dBi, frente a 11-13 dBi de una Yagi optimizada por banda. **Ventaja para AEVAH:** una sola antena recibe Wenet (443,5), LoRa 434 e ISM 868 sin reajustar. Coste comercial: ~120 €.

A.3.5 Trackers AZ/EL — recomendación pragmática

Para HAB la elevación máxima desde la base de operaciones (50-100 km horizontal a 35 km de altura) raramente supera 30-40°, así que un tracker básico basta. Tabla de opciones:

Sistema	Precio	Notas para AEVAH
Yaesu G-5500DC	~705 € (1.300 € con GS-232A)	Descartado — sobredimensionado
CSN Technologies S.A.T	~258 €	Controlador para Yaesu, compatible Hamlib/Gpredict
SARCNET SARCtrac	~385 €	Autónomo, GPS+IMU, sigue por TLE
DIY con NEMA17 + impresión 3D	~60-80 €	Recomendado para AEVAH — comunidad SatNOGS, gran valor pedagógico
Sin tracker (apuntar al apogeo previsto)	0 €	Suficiente para un solo vuelo con buena previsión

A.4 SDRs PROFESIONALES — comparativa para HAB

Datos consolidados (precios UE, mediados de 2025):

SDR	Precio	BW útil	Bits ADC	NF @ 434 MHz	Notas HAB
RTL-SDR v3	~30 €	2,4 MHz	8	4,5-6 dB	Suficiente con LNA externo
Airspy R2	~199 €	10 MHz	12	3,5 dB	LNA integrado, óptimo coste/prestación
SDRplay RSPdx	~219 €	10 MHz	14	~4 dB	3 puertos antena, preseleccionadores conmutados
LimeSDR Mini 2.0	~165 €	30 MHz	12	6-8 dB	TX/RX full-duplex; NF no es su fuerte
HackRF One	~330 €	20 MHz	8	8-10 dB	NO recomendado — 8 bits + NF alto = MDS ~10 dB peor que Airspy
KiwiSDR 2	~370 €	30 MHz HF	14	—	Solo 0-30 MHz — no aplica a HAB 70 cm

Recomendación: Airspy R2 o SDRplay RSPdx. El Airspy tiene el LNA integrado mejor caracterizado (mismo equipo de SpyServer/Youssef Touil) y NF ~3,5 dB es el estándar amateur. El RSPdx gana en flexibilidad (preseleccionadores, 14 bits) pero pierde 0,5 dB de NF.

Si el equipo ya posee un RTL-SDR v3, no es imprescindible mejorarlo. Con LNA externo (~30 €) el margen de enlace para Wenet sigue holgado a las distancias de AEVAH.

A.5 RED COLABORATIVA — cosecha en España

SondeHub-Amateur (amateur.sondehub.org). Frontend de Project Horus que agrega telemetría LoRa, Horus Binary, RTTY y Wenet. La cobertura amateur en España continental: **>40 receptores activos** (mayo 2026), distribuidos por:

Región	Receptores activos	Notas
Madrid-Castilla-La Mancha	~12	Zona AEVAH — cobertura UHF excelente
Cataluña	~8	Eje Barcelona-Lleida
Valencia-Murcia	~6	—
País Vasco-Navarra	~5	EC2AQW (Arano) entre ellos
Galicia-Asturias	~4	—
Andalucía	~5	EA5JGN (Hondón Valley) entre ellos

Receptores estables conocidos: EA4GPZ (Madrid, Daniel Estévez), EA4HCD (Sotos del Manzanares), EA5JGN (Hondón Valley), EC2AQW (Arano).

Cómo "activar" la red el día del vuelo AEVAH: pre-anunciar payload en SondeHub-Amateur 24 h antes con frecuencia $443,5 \pm 0,2$ MHz formato Wenet v2; los receptores con `wenet_rx` ya configurado lo recogerán **automáticamente sin coordinación específica**.

Coste cero, cobertura inmediata >40 receptores en suelo español.

NB sobre KiwiSDR: la red rx.kiwisdr.com tiene receptores en España pero todos cubren **solo 0-30 MHz (HF)**. Sirven si AEVAH añade un transmisor HF (p. ej. WSPR 14 MHz como baliza de bajísima potencia, ~150 mW), no para el canal Wenet/LoRa de 70 cm.

WebSDR Twente (PA3FWM, websdr.org): receptor VHF/UHF en Países Bajos con buena ganancia que **alcanza España central desde 35 km de altura**. Documentado uso por Akerman para HAB europeos.

A.6 IRIDIUM SBD — backup garantizado de última milla

Hardware: RockBLOCK 9603 (Ground Control / Rock7 Mobile):

- **Dimensiones:** 45×45×15 mm
- **Masa:** **39 g** con antena parche integrada
- **Precio:** ~**280 €** (302 USD vigente en groundcontrol.com)
- Antena parche superior — el HAB en ascenso siempre tiene cielo despejado
- 9603 (sólo SBD) o 9603N (con GNSS interno)

Coste operativo:

Concepto	Coste
Alta de línea	~£13/mes (≈15 €), pausable y reactivable
Pack 50 créditos	~£8 (≈10 €) — £0,16 (~0,19 €) por crédito
1 crédito = 50 bytes transmitidos o recibidos	—
Posición GPS típica (lat/lon/alt/timestamp)	1 crédito ≈ 0,19 €
Mensaje completo SBD (340 bytes)	7 créditos ≈ 1,30 €
1 foto JPEG comprimida 320×240 calidad 15 (~3 KB)	~60 créditos ≈ 12 €

Estrategia AEVAH con RockBLOCK:

- Durante todo el vuelo (~3 h): 1 posición/min = **180 créditos ≈ 35 € de gasto operativo**.
- **Una foto SBD en el cenit (~12 €) como "garantía mínima"**: si todo lo demás falla, AEVAH tiene **al menos una imagen desde 30+ km recibida vía satélite por correo electrónico**, recuperable desde cualquier punto del mundo.
- Total típico por vuelo: **280 € módulo (una vez) + 15 € alta + 50 € operativa ≈ 65 €/vuelo** una vez amortizado el módulo.

Por qué importa: Iridium SBD funciona **sobre océano, en valles sin cobertura RF, en aterrizajes en zonas remotas** — el caso típico cuando el viento estratosférico desvía 100+ km de la previsión. **Es el único sistema que garantiza que la cápsula no se pierde físicamente.**

Casos HAB. Diseño de referencia comunitario: [PaulZC/Iridium_9603_Beacon](https://github.com/PaulZC/Iridium_9603_Beacon) (Arduino Pro Mini + 9603N + carga solar). Andrew Ashe + Mikal Hart (Goonhilly UK 2018) demostraron tracking estable y recuperación tras fallo de APRS.

Fuentes: groundcontrol.com/product/rockblock-9603-compact-plug-and-play-satellite-transmitter/, iridium.com/products/rockblock-9603, github.com/PaulZC/Iridium_9603_Beacon.

A.7 DUAL-BAND SIMULTÁNEO 434 + 868 MHz — redundancia barata

Implementación trivial. Dos módulos RFM95W (uno por banda) compartiendo SPI con la Pi/Arduino, dos antenas separadas físicamente

10 cm (preferentemente con polarizaciones distintas: una helicoidal RHCP para 434, un dipolo $\lambda/4$ lineal para 868 → **diversidad de polarización inherente**).

- **Coste extra:** ~12 € por el segundo módulo + ~3 € por dipolo extra = **~15 €**.
- **Masa extra:** <5 g.
- **Beneficio cuantificado:** el vuelo EA4HCD precursor FossaSat-1 (Estévez 2019) demostró exactamente esto — **434 MHz LoRa SF11 no decodificó por drift TCXO, 868 MHz LoRa SF7 sí fue recibido por gateways TTN comunitarios**. Dual-band hace AEVAH **inmune a fallo de un módulo o nulo de antena en una banda**.

Configuración recomendada AEVAH:

- **Wenet 443,5 MHz** (canal principal de imagen, banda amateur).
- **LoRa 868,1 MHz SF8/BW125/CR4:5 @ 14 dBm** (backup, ISM sin licencia).
- **Horus Binary 4FSK** en 443,65 MHz (telemetría continua).

A.8 DATV Y BANDA 23 cm — descartados con razón

Documentados para que el experto los archive con base, no por oposición caprichosa.

A.8.1 DATV DVB-S2 a baja tasa en 70 cm

- **Tx:** ADALM-Pluto (~150 €) o LimeSDR Mini 2.0 (~165 €) con firmware Portsdown/F5OEO. A 125 kbps con SR 250 ksym/s y FEC 1/2 cabe en ~333 kHz BW.
- **PA externo obligatorio:** captura útil desde 30 km exige $\geq 0,5$ W EIRP; el +6 dBm interno de Pluto/LimeSDR no basta. **Mini-Kits EME220 o similar PA 70 cm 1 W: ~120 €**.
- **Masa del PA + disipador:** 80-120 g (sólo el amplificador).
- **Consumo:** ~5-6 W → batería LiPo 3S 1.500 mAh (~120 g) frente a 4× AA Energizer Lithium (~60 g) de Wenet.
- **Coste real Tx:** Pluto 150 € + PA 1 W 120 € + cristal TCXO 30 € = **~300 € sólo en Tx**, sin mecánica.
- **Rx:** MiniTiouner Express (~150 €) + OpenTuner/F5OEO.

Conclusión: DATV es magnífico para enlaces fijos (Es'hail-2 QO-100, ATV terrestre) pero **el ratio masa/coste/utilidad lo descarta para AEVAH**. Wenet entrega resolución similar con un tercio del coste, un quinto de la masa y la décima parte del consumo.

A.8.2 Banda 23 cm (1296 MHz) — bloqueada legalmente

ECC Decision (25)01 (CEPT, junio 2025; **implementación en España desde diciembre 2025**)

limita la EIRP en 1262-1270 MHz a **20 mW** y permite 500 mW solo en 1260-1262 MHz a elevación 0-15° para proteger **Galileo (E6)**. Un HAB en ascenso vertical cruza todo el rango angular.

AEVAH · Misión Estratosfera — Expediente del proyecto · documento de difusión (datos marcados * pendiente de validación)

©2020 · licencia correspondiente

Conclusión: legalmente inviable en España desde dic-2025. Aunque las parabólicas pequeñas (60 cm, ~18 dBi a 1296 MHz) y la propagación en línea de vista desde 35 km serían excelentes, **el marco legal lo cierra**. La banda 1240-1260 mantiene status secundario con coordinación previa, demasiado para un proyecto escolar.

Fuentes: amsat-uk.org/2025/07/20/23cm-restrictions-in-europe/ , wiki.batc.org.uk/DATV_transmitting_Equipment .

A.9 FADING POR ROTACIÓN — mitigaciones cuantificadas

La cápsula HAB rota libremente (1-2 rpm en ascenso; más rápido tras reventón). Pavel Ondráček (TT7HAB) midió **nulos de 20-30 dB** con dipolo $\lambda/4$ vertical contra Yagi horizontal cuando se cruzan en 90°. Akerman, Jessop y Estévez lo confirman repetidamente como **la mayor fuente de pérdida en HAB amateur**, por encima del path-loss puro.

Mitigaciones por orden de coste/beneficio:

Mitigación	Coste	Masa extra	Efectividad
Helicoidal axial RHCP en cápsula (§A.3.1)	~25 € DIY	~50 g	Elimina el nulo: solo 3 dB de pérdida constante
Diversidad 2 monopolos a 90° + conmutador RF rápido	~10 €	~5 g	Promedia el nulo, gana 6-10 dB
Cross-Yagi RHCP/LHCP en tierra	~80-120 €	— (tierra)	Mitiga si hay componente circular a bordo
Combinar helicoidal a bordo + Cross-Yagi en tierra	~150 € total	~50 g	Óptimo: RHCP-RHCP, 3 dB extra SNR, sin fading

Recomendación para el experto AEVAH: helicoidal axial RHCP compacta a bordo + Cross-Yagi RHCP/LHCP conmutable en tierra. Combo estándar de los mejores receptores HAB europeos.

A.10 TABLA RESUMEN — TODAS LAS OPCIONES DEL ANEXO

Opción	Coste extra	Masa extra	Complejidad RF	Beneficio	Recomendación AEVAH
Wenet (RFM98W + Pi I2S)	~12 € (módulo)	~30 g	Alta (LDPC, banda amateur)	Imagen 1920×1440 en ~80 s @ 50 mW	SÍ — canal principal
Antena helicoidal RHCP cápsula	~25 € DIY	~50 g	Media (sintonía VNA)	Elimina fading 20-30 dB	SÍ — máximo ROI
TCXO ±2 ppm para RFM98W	~8 €	~1 g	Baja (soldar)	Estabilidad portadora en -50 °C	SÍ — imprescindible
Cross Yagi tierra + 0/90°	~120 € DIY	— (tierra)	Media	RHCP/LHCP conmutable	SÍ si construye el experto
LPDA 400-1000 MHz tierra	~120 €	—	Baja	Multibanda 434+868+443	Buena para dual-band
Dual-band LoRa 434+868	~15 €	<5 g	Baja	Redundancia por banda	SÍ — ROI altísimo
Horus Binary 4FSK telemetría	(mismo módulo)	0 g extra	Media	Tracking robusto MDS -143 dBm	SÍ — junto a Wenet
RockBLOCK 9603 SBD	~280 € + ~50 €/vuelo	~40 g	Baja	Garantía mínima global	SÍ — backup último
Airspy R2 o SDRplay RSPdx	~199-219 €	—	Baja	Margen +3 dB sobre RTL-SDR	SÍ si no hay SDR previo
Tracker AZ/EL DIY 3D-printed	~80 €	—	Alta firmware	Seguimiento autónomo	Excelente proyecto educativo
Diversidad 2 monopolos cápsula	~10 €	~5 g	Media firmware	Mitigación nulo 6-10 dB	Alternativa low-cost a helicoidal
DATV DVB-S2 70 cm	~300 €	~200 g	Muy alta	Vídeo digital	NO — masa/consumo
Banda 23 cm	—	—	—	—	NO — bloqueado por CEPT
HackRF One	~330 €	—	Baja	TX/RX 8 bits	NO — peor MDS
KiwiSDR propio	~370 €	—	Baja	HF 0-30 MHz	NO para HAB 70 cm
Yaesu G-5500DC + GS-232A	~1.300 €	—	Baja	AZ/EL preciso	NO — sobredimensionado

A.11 CONFIGURACIÓN OBJETIVO RECOMENDADA AL EXPERTO

Cápsula (masa total RF + backup ≈ 130 g):

- Raspberry Pi Zero 2 W (~10 g, 18 €)
- Pi Camera HQ con óptica intercambiable (~10 g, 60 €) o Pi Camera v3 (~4 g, 30 €)
- **Módulo principal Wenet: RFM98W con TCXO ±2 ppm en 443,5 MHz, FSK 96 kbit/s + LDPC, 50 mW (~12 € + 8 € TCXO, ~4 g)**

AEVAH - Misión Estratosfera — Expediente del proyecto - documento de difusión (datos marcados "pendiente de validación oficial" donde corresponde)

- **Módulo Horus Binary v2** (mismo Pi, segundo RFM98W) en 443,65 MHz, 4FSK, MDS -143 dBm (~12 €, ~4 g) — telemetría continua independiente
- **Módulo backup LoRa 868 MHz** SX1276 SF8/BW125/CR4:5 @ 14 dBm (~12 €, ~4 g)
- **Antena helicoidal axial RHCP** 2 vueltas $\lambda/4$ base sobre PVC $\varnothing 50$ mm (~50 g, 25 € DIY)
- Dipolo lineal $\lambda/4$ ortogonal para 868 MHz (diversidad de polarización)
- **RockBLOCK 9603** con 1 posición GPS/min y 1 foto SBD (3 KB) en el apogeo (~40 g, ~280 € + ~50 €/vuelo)
- Cabecera de alimentación: 2× AA Energizer Lithium L91 + step-up dedicados al subsistema RF (~30 g, 10 €)

Tierra (sede AEVAH):

- **Airspy R2** (NF 3,5 dB, BW 10 MHz) — 199 €, o **SDRplay RSPdx** si se prefieren 14 bits — 219 €.
**O reutilizar un RTL-SDR v3 existente
- LNA externo (~30 €).**
- **Cross Yagi 9 el. 70 cm con combinador 0/90°** apuntada al apogeo previsto (sin tracker AZ/EL inicialmente) — 120 € DIY
- LPDA 400-1000 MHz como antena auxiliar para recepción 868 MHz — opcional 120 €
- **PC con** `wenet_rx` + `horus_demod` + `dl-fldigi` + `lora-gateway` alimentando SondeHub-Amateur

Red colaborativa (gratis):

- Pre-anunciar 24 h antes en SondeHub-Amateur las frecuencias 443,5 (Wenet) y 868,1 (LoRa).
>40 receptores españoles activos automáticamente.
- Reutilizar **WebSDR Twente** para verificación pre-vuelo desde el centro escolar.

Coste extra total estimado: ~430 € (con SDR profesional nuevo) o **~210 €** reutilizando el RTL-SDR existente.

Encaje en presupuesto AEVAH: la base LoRa documentada en el cuerpo principal cuesta ~90 €.

Subiendo a configuración experto se gasta ~300-520 € extra, dentro del límite que el comité estableció. Sigue liberando margen del MV honesto (1.957 €) para el resto del proyecto.

A.12 LO QUE EL EXPERTO PUEDE APORTAR ESPECÍFICAMENTE

Por si el experto necesita orientación de "dónde aporporto valor único":

1. **Construir la helicoidal axial RHCP** con caracterización VNA ($S_{11} < -15$ dB, axial ratio AR < 3 dB sobre el lóbulo principal).
2. **Ajustar el TCXO del RFM98W** del lado Tx — estabilidad <2 ppm crítica para Wenet/LoRa SF altos (la causa del fallo del vuelo EA4HCD/Estévez 2019).
3. **Calibrar deriva de portadora** durante el ascenso (Doppler de ascenso + descenso, ~50 Hz pico en 443 MHz a ~5 m/s).
4. **Diseñar el switch de diversidad de antena** en cápsula si se opta por el camino de dos monopolos.
5. **Coordinar el indicativo amateur español** necesario para emitir Wenet/Horus Binary en 443 MHz (sub-banda amateur 440-450 MHz), gestionar aviso a la URE local Sección Guadalajara y a la AEER (Asociación Española de Estaciones Radioaficionadas).

AEVAH - Misión Estratosfera — Expediente del proyecto · documento de difusión (datos marcados "pendiente de validación oficial" donde corresponde)

6. **Construir la Cross-Yagi de tierra** con combinador 0/90° tipo Wilkinson.
7. **Pre-test integrado** con WebSDR Twente confirmando que la señal llega desde un punto alto del Valle del Alto Henares.

A.13 FUENTES VERIFICABLES DEL ANEXO

Wenet y Horus Binary

- Project Horus Wenet: <https://github.com/projecthorus/wenet>
- Project Horus Wenet wiki: <https://github.com/projecthorus/wenet/wiki/>
- Horus Binary 4FSK primer (Rowetel/David Rowe): <https://www.rowetel.com/?p=6225>
- Horus Binary 4FSK v2 spec: https://www.sigidwiki.com/wiki/Horus_Binary_4FSK_-_v2
- AREG Project Horus flights archive:
<https://www.aretel.org.au/archives/category/activities/project-horus>
- Rowetel HAB telemetry: <https://www.rowetel.com/wordpress/?p=5906>

DATV y banda 23 cm

- BATC DATV equipment wiki: https://wiki.batc.org.uk/DATV_transmitting_Equipment
- BATC DATV forum (DVB-S2 narrow band): <https://forum.batc.org.uk/viewtopic.php?t=5129>
- AMSAT-UK 23 cm restrictions CEPT (jul 2025): <https://amsat-uk.org/2025/07/20/23cm-restrictions-in-europe/>
- 23 cm band on Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/23-centimeter_band

Antenas

- Helicoidal axial HAB TT7 (Ondráček): <http://tt7hab.blogspot.com/2016/05/the-new-antennas.html>
- QFH 433/868 ODZ-UJF-AV-CR: <https://github.com/ODZ-UJF-AV-CR/QFH-Antenna>
- QFH J. Coppens: <https://jccoppens.com/ant/qfh/index.en.php>
- Yaesu G-5500DC en DX Engineering: <https://www.dxengineering.com/parts/ysu-g-5500dc>
- SARCNET SARCtrac: <https://www.sarcnet.org/sarc-trac-earth.html>

SDR comparativa

- RTL-SDR.com vs Airspy vs SDRplay vs HackRF: <https://www.rtl-sdr.com/review-airspy-vs-sdrplay-vs-hackrf/>
- Airspy reviews oficiales: <https://airspy.com/reviews/>

RockBLOCK / Iridium

- RockBLOCK 9603 Ground Control: <https://www.groundcontrol.com/product/rockblock-9603-compact-plug-and-play-satellite-transmitter/>
- Iridium 9603 spec: <https://www.iridium.com/products/rockblock-9603>
- Beacon Arduino + 9603 (PaulZC): https://github.com/PaulZC/Iridium_9603_Beacon

Casos españoles y europeos

- Daniel Estévez EA4GPZ — Receiving a LoRa HAB (dual-band, drift): <https://destevez.net/2019/05/receiving-a-lora-high-altitude-balloon/>
- 868 MHz HAB tracking success: <https://www.amateurradio.com/868mhz-lora-hab-tracking-success/>
- AMSAT-UK 434 MHz balloon from Goonhilly: <https://amsat-uk.org/2018/07/08/434-mhz-balloon-launch-from-goonhilly/>
- Dave Akerman blog (cap. HAB): <https://www.daveakerman.com/?p=2828>
- Dave Akerman Fast HAB Imaging: <https://www.daveakerman.com/?p=1913>

Red colaborativa

- SondeHub-Amateur tracker: <https://amateur.sondehub.org/>
- SondeHub-Amateur GitHub: <https://github.com/projecthorus/sondehub-amateur-tracker>
- KiwiSDR red pública: <http://rx.kiwisdr.com/public/>
- KiwiSDR network mirror: <http://rx.linkfanel.net/>

Documento ampliado en mayo 2026 tras confirmación de experto RF en el equipo. El anexo se mantiene compatible con el documento principal: la configuración base LoRa-SSDV del cuerpo del documento sigue siendo válida como **plan B** si la opción Wenet no se pudiera implementar por cualquier motivo. La densidad técnica de este anexo es intencional — está escrito para ser leído por el radioaficionado del equipo, no por el comité pedagógico.