Versión Final

Tecnologías innovadoras para dar conectividad en lugares apartados con usuarios dispersos

Programa Líderes, LACNIC, 2025

Leonardo Vargas
COLOMBIA

Descripción general de la investigación

Conectar regiones remotas mediante tecnologías tradicionales como WiFi o redes celulares es frecuentemente inviable por limitaciones técnicas y económicas. Este proyecto propone explorar el uso innovador de la banda de alta frecuencia (HF), de propagación ionosférica de larga distancia, para comunicaciones básicas en canales angostos (5 kHz), que son suficientes para aplicaciones esenciales de mensajería y correo electrónico.

Se analizan aspectos tecnológicos y regulatorios clave para implementar esta solución, especialmente dirigida a pescadores artesanales y comunidades aisladas.

Incluye una investigación documental sobre las experiencias previas en el uso de la banda HF para comunicaciones digitales, con énfasis en reportes técnicos y análisis regulatorios. También presenta una simulación para evaluar su factibilidad para las aplicaciones propuestas en una zona del pacífico Colombiano, así como opiniones, expectativas y sugerencias sobre su viabilidad práctica, su aceptación social y las posibles estrategias para mitigar la escasez de capacidad en dispositivos que están diseñados para estar bien conectados.

Introducción

En muchas regiones rurales y apartadas, la falta de infraestructura impide brindar conectividad mediante redes celulares o internet convencional. La banda de HF, tradicionalmente usada para comunicación de largo alcance, es una alternativa para ofrecer servicios digitales básicos (mensajería de texto, correo electrónico) en comunidades remotas con poblaciones dispersas. En la última década se han desarrollado y probado soluciones que utilizan canales HF angostos para enviar datos, aprovechando la propagación ionosférica para cubrir mayores distancias sin necesidad de grandes inversiones de infraestructura (Orlova & Veloso, 2020).

Este informe ofrece una revisión inicial sobre su uso para conectividad digital rural, abarcando aspectos técnicos, regulatorios, casos de aplicación y consideraciones de aceptación social y sostenibilidad.

Aspectos técnicos de la comunicación digital por HF

Propagación y alcance de la banda HF

La banda de HF abarca frecuencias de 3 a 30 MHz y longitudes de onda de 100 a 10 metros; corresponde a la porción de onda

corta del espectro radioeléctrico. Su principal característica es la posibilidad de propagación ionosférica: las señales se refractan en las capas ionizadas y pueden regresar a tierra a cientos de kilómetros del transmisor. Gracias a esto, es posible cubrir regiones extensas sin infraestructura intermedia. En la práctica, el alcance y calidad del enlace HF varían según múltiples factores físicos, como el ciclo solar, la hora del día y las condiciones ionosféricas locales (WMO - Regional Training Institute, Pune).

De acuerdo con el ángulo de radiación, las señales pueden retornar a zonas cercanas y abarcar poblaciones locales, o llegar a otros países. La primera configuración es la ideal para el objeto de este estudio.

Las señales de HF tienden a ser susceptibles al ruido y a interferencias entre usuarios, pues es utilizada por radioaficionados, emisoras de radio internacional, servicios marítimos, entre otros. Esto supone retos en modulación y, especialmente, legislación.

Modulación y técnicas de transmisión digital

Debido a que la banda de HF fue utilizada inicialmente para servicios de voz y telegrafía, usa canales con ancho de banda estrecho, por ejemplo, un canal de voz SSB ocupa aproximadamente 2.4 kHz. En sistemas digitales actuales, se utilizan hasta 5 kHz para mejorar la capacidad de transmisión. Recientemente se han hecho avances en modulaciones digitales optimizadas para HF.

Modos digitales tradicionalmente usados por radioaficionados, como RTTY, PSK31 y Olivia permiten enviar texto a una tasa de entre 10 y 50 palabras por minuto. Usan canales de menos de 500 Hz y funcionan con señales débiles, lo que los hace adecuados para mensajes de texto cortos en condiciones adversas.

Protocolos como PACTOR se convirtieron en estándar de facto para enviar correos electrónicos por HF. PACTOR 3 logra velocidades de 5 kbps efectivos con compresión de texto (Rural Development Volunteers Association, 2003) y la versión más reciente, PACTOR 4, puede alcanzar 10.5 kbps usando canales de 2.5 kHz (Farallon Electronics, 2025). Los módems pueden cambiar dinámicamente a esquemas más lentos y robustos cuando la relación señal a ruido (SNR) disminuye, y utilizar ARQ para garantizar la entrega.

ARDOP (WinLink, 2025) es un protocolo digital abierto para uso con tarjetas de sonido o dispositivos de procesamiento digital de señales (DSP), compatible con sistemas operativos modernos y diseñado para HF y VHF. Permite enviar correos electrónicos usando sistemas como Winlink (WinLink, 2025), una red de radioaficionados que provee acceso a correo electrónico por radio en sitios donde no hay acceso a Internet. Como PACTOR, utiliza ARQ o FEC

como estrategia para mitigar errores de transmisión.

Otra estrategia es adaptar estándares de radio digital. Digital Radio Mondiale (DRM), originalmente diseñado para radiodifusión digital, emplea modulación OFDM. En modo de 10 kHz puede transmitir audio y datos a una tasa de hasta 19.6 kbps, pero tiene un modo reducido de 5 kHz pensado para reemplazar una señal SSB por voz o datos. Investigadores de Brasil experimentaron con DRM para datos en HF y demostraron que es posible transmitir paquetes a varios kbps; el proyecto HERMES (High-frequency Emergency and Rural Multimedia Exchange System) demostró que DRM puede ser viable para conectar comunidades (Rhizomatica, 2020).

En el ámbito de radioaficionados, surgieron modos como FT8, que usa técnicas de transmisión muy lentas y codificación redundante para lograr comunicaciones con SNR de hasta -20 dB, a una tasa de 6.09 bps (aproximadamente 5 palabras por minuto). JS8Call es un experimento que agregó una capa de mensajería y protocolo de red a FT8. Aunque no hay un uso establecido para ellos, podrían utilizarse para emergencias o casos donde sólo se requiere enviar confirmaciones o peticiones mínimas, bajo las peores condiciones de propagación (Hinson, 2021).

Las tasas de transmisión que permiten estas tecnologías son suficientes para servicios de mensajería asincrónica como correos electrónicos de texto o chat, lo cual es aceptable para intercambiar información esencial en comunidades aisladas, sin grandes intervenciones en infraestructura y evitando la saturación por contenido prescindible (Orlova & Veloso, 2020).

Protocolos de red y operación de enlaces HF

Existen protocolos adicionales para gestionar la conexión y el flujo de datos. La mayoría de las implementaciones usan esquemas de ARQ, donde el receptor confirma los paquetes buenos y pide el reenvío de los corruptos. Sobre el enlace ARQ se puede montar un servidor de correo electrónico o mensajería.

En redes Winlink, por ejemplo, el cliente establece un enlace ARQ HF con un Gateway de mensajería conectado a internet. El protocolo soporta intercambio de mensajes en formato de correo electrónico, que el Gateway envía a su destino. Winlink usa un protocolo propio pero compatible con el estándar, permitiendo que una cuenta interna intercambie mensajes con cualquier dirección tradicional externa. Así, las estaciones cliente se conectan a los Gateway cuando el canal está disponible, envían y reciben los mensajes, y se desconectan para que otro lo utilice.

En otros casos la comunicación puede ser punto a punto: dos estaciones pueden intercambiar correos directamente sin

infraestructura central, siempre que coordinen por cuál frecuencia se enlazarán. Esto se usó en las Islas Salomón (PFnet), donde una estación servía de buzón central, pero las remotas podían contactarla directamente (Rural Development Volunteers Association, 2003).

Aunque es técnicamente posible utilizar protocolos estándar como SMTP y POP3 sobre enlaces HF, su desempeño resulta poco eficiente En su lugar se emplean protocolos ligeros optimizados, a menudo con compresión y agregación de emails antes de transmitir (Isode, 2025).

Un enfoque reciente fue usar el correo electrónico como base para chat: el proyecto HERMES integra un cliente con interfaz amigable que ayuda a enviar correos, pero los presenta como un hilo de mensajes de chat. Otras iniciativas utilizan puentes de APRS (Automatic Packet Reporting System) para pasar mensajes cortos a internet o SMS, aunque tradicionalmente se utilizan para telemetría.

Otro componente importante es la gestión de frecuencias y enlace. En HF, a diferencia de las redes fijas, se debe elegir una frecuencia de acuerdo con el horario y las condiciones del canal. Sistemas militares y redes avanzadas implementan ALE (Automatic Link Establishment), donde cada estación escanea una lista de frecuencias predefinidas y envía ráfagas cortas de identificación; las estaciones envían mensajes hasta encontrar una frecuencia mutua. Las versiones ALE de 3a y 4a generación también integran sensado de espectro para negociar dinámicamente el ancho de banda disponible (Rockwell Collins, 2014). En entornos comunitarios la implementación de ALE sería compleja y costosa, pero su función se puede subsanar con estrategias simples, por ejemplo, la interfaz de HERMES permite que el radio escuche y conmute automáticamente de canal según el requerimiento de capacidad, y en proyectos más sencillos se pueden elegir frecuencias fijas por horario.

La alimentación eléctrica también es un aspecto crítico: las estaciones rurales suelen operar con energía solar y baterías. PFnet, por ejemplo, equipó sus estaciones con paneles solares de 80 W. En esa línea, proyectos en Amazonía reportan que el desgaste de las baterías es un obstáculo operativo importante (Orlova & Veloso, 2020). Por eso parte del diseño técnico debe incluir sistemas solares confiables, controladores de carga y, principalmente, capacitación a las comunidades locales para que se encarguen del mantenimiento de los equipos.

Aspectos regulatorios del uso de HF

A nivel global, la banda HF está asignada por la UIT a diversos servicios de radio: radiodifusión de onda corta, servicio móvil terrestre, servicio móvil marítimo, servicios

aeronáuticos, servicio fijo punto a punto, radioaficionados y aplicaciones científicas. No existe una asignación específica mundial para internet en HF, por lo que los proyectos deben encuadrarse en alguna categoría existente. Esto ha generado retos regulatorios, ya que cada país administra las licencias HF de forma diferente y muchas veces las normativas no habían anticipado usos comunitarios digitales.

Licenciamiento y restricciones generales

En la mayoría de los países, operar un transmisor HF requiere una licencia de la entidad gubernamental encargada de la gestión del espectro. Algunos de los usos típicos son:

Radioaficionados: Permite a individuos operar en bandas designadas para experimentación, usualmente sin fines comerciales. Los radioaficionados han sido pioneros en transmisiones digitales, pero algunas regulaciones prohíben transmisiones con terceros, contenido comercial o el uso de técnicas de cifrado. Esto imposibilita utilizar directamente las bandas de radioaficionados para brindar servicios de mensajería a personas, salvo en situaciones de emergencia. Por ejemplo, en Estados Unidos apenas en 2022 se flexibilizó una norma que limitaba la velocidad de símbolos en HF, habilitando protocolos como PACTOR 4 (Sea-Tech Systems, 2023), pero sigue prohibido transmitir datos codificados. Proyectos comunitarios suelen evitar depender de estas bandas, salvo que integren voluntarios para operaciones de emergencia puntuales.

Banda ciudadana (CB): En HF existe la CB (27 MHz), disponible al público en muchos países con límites estrictos para su uso. En Colombia, por ejemplo, se rige por la Resolución 964 de 2019 y tiene por objeto "atender necesidades de carácter cívico, recreativo, educativo, cultural, científico y asistencial, sin fines políticos, religiosos, comerciales o de lucro, y su uso tendrá prioridad en situaciones de socorro y seguridad de la vida humana" (MinTIC Colombia, 2021). En general, estas bandas no permiten modos digitales eficientes ni antenas grandes, por lo que su utilidad para datos es marginal.

Servicio móvil terrestre o fijo: Empresas y ONGs pueden solicitar frecuencias exclusivas para sus redes privadas, que suelen tramitarse como licencias de Servicio Limitado Privado. En Brasil, por ejemplo, las redes comunitarias han tenido que gestionar permisos bajo esta figura, pero deben pasar un proceso burocrático y costoso que dificulta obtener legalmente los permisos de uso. Muchas veces las organizaciones terminan operando sin licencia explícita, usando canales disponibles por estar en zonas apartadas, pero sin protección contra interferencias y con los riesgos legales que eso implica (Orlova & Veloso, 2020).

Banda marítima y aeronáutica: Pescadores y barcos pequeños a veces usan radios HF en bandas marítimas para comunicarse con el puerto o entre sí. Estas están sujetas al reglamento marítimo y suelen requerir licencia de barco, además, las frecuencias se comparten internacionalmente para seguridad náutica. Aunque existen sistemas de datos en HF marítimo (SITOR, SailMail, etc.), su uso es limitado. En la práctica, pescadores artesanales rara vez tienen los equipos necesarios y suelen usar sólo voz por HF o VHF (FAO, 2025). Algunos gobiernos han experimentado con que cooperativas de pescadores usen tecnologías de radioaficionados o CB.

Uso militar o gubernamental: Los gobiernos tienen asignadas numerosas frecuencias HF para manejo interno del Estado. Estas no están disponibles para civiles, pero en emergencias algunos gobiernos pueden autorizar a organizaciones civiles a usar esos canales para apoyo humanitario. En situaciones de desastres, por ejemplo, radioaficionados y voluntarios pueden operar en frecuencias de 5 MHz cedidas temporalmente por las Fuerzas Armadas para coordinar esfuerzos. En general, este uso no es sostenible para proyectos civiles.

El panorama en Latinoamérica, África y Asia para licenciamiento HF civil presenta patrones comunes: la mayoría de los países sigue modelos heredados de Europa o Estados Unidos, donde las opciones son o radioaficionado o licencia comercial. Hay pocos ejemplos de regulaciones flexibles para esfuerzos comunitarios en HF; a diferencia de las bandas VHF/UHF, en HF no hay tanta apertura.

Países como Brasil, México y Argentina exigen licencias para cualquier operación en HF. En Brasil, grupos como ABRADIG abogan por facilitar licencias para conectar comunidades de la Amazonía (APC, 2025). México permitió experimentos de Rhizomatica en la comunidad Villa Talea de Castro, en Oaxaca, pero es posible que hayan tramitado un permiso experimental temporal. En Centroamérica y el Caribe, algunas ONG han usado frecuencias regionales asignadas a emergencias. En general, Latinoamérica carece de una categoría de HF comunitaria en la regulación, por lo que las iniciativas deben forzarse al marco legal.

En Colombia, el Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones (MinTIC) tiene procedimientos claros para la asignación y uso del espectro radioeléctrico mediante mecanismos de selección objetiva de proponentes (MinTIC, 2025); el espectro de HF está sujeto a licenciamiento por parte del estado y cualquier entidad, incluyendo asociaciones comunitaria o campesinas, debe seguir este proceso, que contempla el pago de contraprestaciones.

Además, hay restricciones de uso: el Decreto 963 de 2009 (CRC, 2009) indica claramente que el servicio de radioaficionado tiene por objetivo la instrucción individual, la

intercomunicación y los estudios efectuados por aficionados debidamente autorizados, con fines exclusivamente personales y sin ánimo de lucro; la transmisión de mensajes a terceros, salvo por actividades propias de radioaficionados o en situaciones de emergencia, está prohibido. El uso detallado de la banda se encuentra en documentos de la Agencia Nacional del Espectro (ANE, 2022), que es la entidad técnica asociada al MinTIC.

Colombia está haciendo esfuerzos para apoyar proyectos de conectividad rural usando bandas distintas a HF, como son los Espacios en Blanco de Televisión (TVWS). Es posible acceder a porciones de espectro en un modelo de experimentación temporal y prototipado, y se están haciendo esfuerzos por extender el acceso a otras bandas de frecuencia, como la de 900 MHz para internet comunitaria usando IMT (MinTIC, 2025).

En Papúa Nueva Guinea, la organización MAF coordinó con el gobierno para proveer radio HF a comunidades y organizaciones, integrándolas en la red nacional de comunicación de emergencias (MAF, 2021).

En muchos países africanos, las misiones religiosas y ONG médicas han operado radios HF de voz durante décadas. Estas funcionan bajo licencias genéricas otorgadas al sector salud o directamente a las ONG.

En India, los pescadores reciben alertas de tormenta vía radio. El gobierno de Bengala Occidental anunció en 2014 un plan para usar radioaficionados para alertar a pescadores sobre condiciones meteorológicas adversas, lo que significa integrarlos a la defensa civil. Con la ayuda del departamento de pesca, iniciaron los procesos para obtener los permisos necesarios para operar constantemente (AITC, 2014).

En Indonesia, un estudio sobre la preparación del país para eventuales desastres estableció como una recomendación el incremento de la capacidad y la interoperabilidad de tecnologías de comunicación, siendo la implementación de comunicaciones de HF la décima en la lista (Collopy et al, 2020).

Otro aspecto crucial es el uso de cifrado y la privacidad. Muchas comunidades, debido a situaciones de orden público o simplemente por confidencialidad de la información, desean proteger sus comunicaciones. En sistemas como HERMES se integró el cifrado simétrico GnuPG (Orlova & Veloso, 2020), pero ciertas regulaciones impiden transmisiones en donde el contenido viaja protegido. Este es un aspecto que debería evaluarse para cada caso de uso.

En general, se ha avanzado poco en los aspectos regulatorios para el uso de HF digital comunitaria. Los proyectos han prosperado a pesar de las dificultades gracias a alianzas con autoridades y a que están en marcados en experimentos, en lugar de ser usos establecidos ampliamente.

Casos de uso en comunidades aisladas

Redes pioneras de correo HF

Uno de los casos más citados es la People First Network (PFnet) de las Islas Salomón, iniciada en 2001. Estableció un grupo de estaciones de email HF en comunidades remotas de distintas islas, todas enlazadas con una estación central en Honiara (Leeming, 2008) y usó radios PACTOR con el software Wavemail (Rural Development Volunteers Association, 2003). Cada aldea tenía una operadora encargada de asistir con el envío de mensajes, principalmente relacionados con salud, educación, familia y política.

PFNet involucró a comités locales y operadores comunitarios, lo que fue crucial para la aceptación por parte de la comunidad. Cada estación tenía un comité que aportaba al cuidado del equipo y establecía las tarifas. Aunque el mantenimiento de la red dependía de subsidios externos, cuando se terminó el apoyo varias estaciones siguieron operando, integrándose luego a proyectos de radios comunitarias FM con apoyo de la UNESCO (UNESCO, 2014).

América Latina

En América Latina ha crecido el interés en HF para conectar comunidades apartadas. Un proyecto emblemático es HERMES, desarrollado por Rhizomatica junto a la Asociación Brasileña de Radio Digital (ABRADIG) y otras entidades. En 2017 logró el primer prototipo funcional de datos por HF en la comunidad Amazónica de Acre, utilizando estándares DRM sobre equipos HF modificados (Orlova & Veloso, 2020). Desde entonces, Rhizomatica ha implementado HERMES en Oaxaca, México; Pará y Rondônia, Brasil; y Achuar, Ecuador.

Comunicaciones HF para pescadores

Los pescadores artesanales y comunidades costeras aisladas enfrentan desafíos particulares de conectividad: pasan días mar adentro sin cobertura celular, usualmente con radios VHF de baja potencia o sin ningún tipo de conectividad. Históricamente, muchos pescadores han usado radios HF para reportar su posición y recibir pronósticos meteorológicos y, en las últimas décadas, se han introducido sistemas para enviar email vía HF desde barcos.

SailMail es una red internacional de estaciones costeras que ofrece servicio de email por HF a embarcaciones privadas. Requiere módems PACTOR o similares, con los costos que ello implica.

Winlink es una red de radioaficionados que brinda apoyo a embarcaciones, es gratuito, pero requiere que alguien a bordo tenga licencia de radioaficionado. La Guardia

Costera de Estados Unidos y otros grupos de rescate han reconocido que, en eventos catastróficos, Winlink ha sido crucial para comunicarse. Resaltan eventos como el Huracán María en Puerto Rico, los incendios en California y la tormenta helada en Kentucky (Sherrod). Y en América Latina y el Caribe, el terremoto de Haití.

En cuanto a pescadores artesanales en países en desarrollo, hay iniciativas interesantes de uso de HF para seguridad y conservación. Un caso en Perú es el proyecto de conservación marina ProDelphinus, que implementó un programa de radio HF bidireccional con pescadores para reducir la captura accidental de especies (The State of the World's Sea Turtles, 2012). El personal en tierra se comunica con los pescadores para avisarles de áreas con alta presencia de tortugas, delfines, mantarrayas y ballenas, o darles instrucciones para liberarlas de sus redes. También reciben información de seguridad para su actividad.

Y en la Isla Wululu de Papua Nueva Guinea, es esencial para la seguridad marítima de los viajeros y pescadores que navegan entre la isla y la costa (Suarkia, 2021).

La mensajería digital supone otro reto, pues las embarcaciones artesanales usualmente no tienen computadores a bordo. Existe una oportunidad de innovación para dispositivos más integrados y compactos, que podrían aprovechar estas comunidades.

Factores para la aceptación social

Al explorar experiencias previas en proyectos de conectividad rural usando TVWS y contrastarlas con las encontradas en el ámbito de HF, se pueden identificar aspectos comunes que ayudaron al éxito en términos de aceptación social: la participación activa de la comunidad en el diseño, desarrollo y mantenimiento; la percepción de valor en el uso cotidiano; la presencia de un modelo económico más allá del subsidio institucional, que permite la escalabilidad después del piloto; el alcance geográfico; la resiliencia de la infraestructura; y la aceptación de alternativas comerciales y no comerciales que eventualmente llegarán.

Como en la mayoría de las tecnologías, el uso militar es la principal fuente de innovación. Sin embargo, la llegada a comunidades apartadas tiende a ser mucho más lenta, debido a que no existe una oportunidad comercial clara para los operadores. En la medida en que dichas alternativas lleguen al territorio, tecnologías como HF y TVWS deben ayudar a "correr la línea" para ofrecer servicios a personas aún más alejadas. Este debe ser un trabajo constante, especialmente en países Andinos y Amazónicos donde las condiciones de radiopropagación son extremas.

Viabilidad práctica y económica

El pacífico colombiano es una zona apartada en la que se han implementado varios proyectos de conectividad rural, con distintas tecnologías como los TVWS y las redes celulares comunitarias en la banda de 900 MHz. Sin embargo, hay zonas como resguardos indígenas que están aún más alejados y adentrados en el manglar, donde estas soluciones resultan insuficientes. Allí es posible pensar en la conectividad HF como alternativa viable. Un trabajo de caracterización completa de estas comunidades y sus dinámicas fue realizado en el marco del Programa Líderes de LACNIC, en 2024 (Beltrán, 2024).

Simulaciones

Para realizar estudios de viabilidad técnica de tecnologías inalámbricas, es común utilizar herramientas de planificación con modelos de propagación. Esto permite hacer una evaluación inicial teniendo en cuenta las características del terreno.

Como las estructuras públicas más altas de la zona de Juanchaco (Bahía Málaga) son las torres del acueducto, se realizaron simulaciones de cobertura desde ese punto. Se utilizó el sistema de planificación de redes inalámbricas Celgis (Madrinan, Rincon, & Navarro, 2019), con los parámetros de la Tabla 1.

Los resultados se muestran en la Figura 1; allí es posible identificar zonas en donde podría validarse un prototipo de HF. El área de servicio, en azul, cubre toda la zona sin mayores obstáculos.

Modelo de propagación	Deygout
Longitud	-77.36356928
Latitud	3.9456213949
Altura de la torre	18 m
Radio de simulación	50 km
Potencia	50 dBm (100 W)
Frecuencia	30 MHz
Antena	Omnidireccional
Ganancia	0 dBi

Tabla 1. Parámetros de simulación

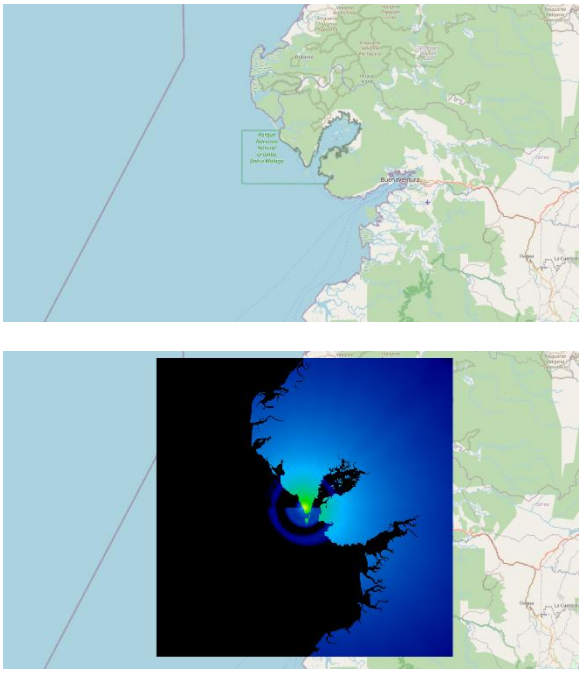

Figura 1. Simulación Deygout en banda de HF

El modelo de propagación Deygout puede brindar resultados en banda de HF teniendo en cuenta las características del terreno, sin embargo, este no es capaz de computar sobre el agua. Analizando los gráficos, es válido inferir que desde ese punto es viable ofrecer servicio en toda la bahía.

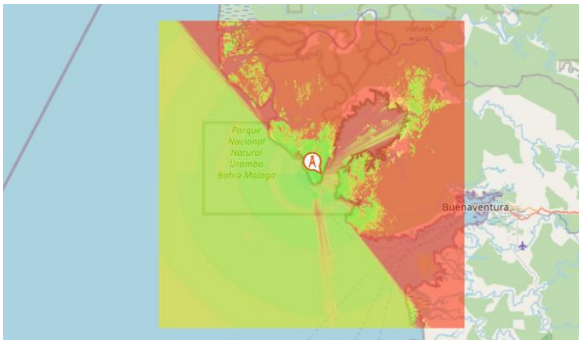

Figura 2. Simulación Epstein-Peterson en HF

También se utilizó el modelo de propagación Epstein-Peterson, resultado que se muestra en la Figura 2. Este permite identificar que el área de la bahía sería la de mejor cobertura, mientras que la zona del manglar, hacia el norte, tendría mayores dificultades de comunicación.

Costos

Experiencias previas como la de PFnet documentaron costos de alrededor de US$8.000 por sitio, para cubrir el equipamiento básico: computador de baja capacidad, transmisor HF, módem y antena, acompañados de baterías y paneles solares. HERMES también diseñó una guía para facilitadores e instaladores comunitarios con todas las especificaciones técnicas (Bloom, 2021).

La Tabla 2 muestra costos aproximados en dólares de los diferentes elementos, sin embargo, avances recientes en Radio Definida por Software (SDR) ayudan a reducirlos considerablemente. Por ejemplo, ya es posible encontrar transmisores HF desde $500. Esta tecnología también permite transferir el procesamiento del módem a un computador de mayor capacidad.

Transmisor HF	$1.000 - $2.000
Módem digital	$1.500 - $2.000
Computador	$200 - $500
Antena HF	$50 - $200
Panel solar	$150 - $300
Controlador de carga	$50 - $150
Batería	$200 - $300

Tabla 2. Costos aproximados en USD

A estos valores de equipamiento es necesario añadir los costos asociados a la mano de obra, la adecuación del espacio físico, el entrenamiento comunitario y el mantenimiento periódico de los sistemas.

Otros retos técnicos y oportunidades

El uso de la banda HF en entornos de difícil acceso abre un abanico de retos técnicos y oportunidades para la innovación social.

En el plano técnico, el acceso a información de propagación en tiempo real gracias a redes como PSKReporter (PSK Reporter, 2025), que permiten conocer de forma colaborativa qué bandas HF están abiertas hacia qué lugares (Tal, 2025), combinado con técnicas de radio cognitiva, podría dar lugar a procesos automatizados para mejorar el uso de la banda, pues facilita la adaptación a frecuencias y horarios. Incorporando SDR, permitirían una gestión más flexible del espectro: estos equipos pueden cambiar de

frecuencia, probar modulaciones distintas y ocupar varias porciones de banda simultáneamente. Aunque los SDR HF potentes son costosos, iniciativas open hardware como Hermes-lite (Haynal, 2025) y sBitx (sBitx, 2025) están poniendo a disposición de la comunidad toda la información necesaria para construirlos.

En el ámbito regulatorio hay retos importantes. La ausencia de categorías legales específicas para proyectos comunitarios en HF limita las posibilidades de implementación formal y sostenible. Aunque existen antecedentes de flexibilización normativa en ciertos países, la mayoría de los marcos regulatorios en América Latina siguen restringiendo el uso de la banda a fines militares, gubernamentales, comerciales o de radioaficionados. Superar este obstáculo exigirá un diálogo activo con autoridades nacionales e internacionales, orientado a reconocer el valor social de estas iniciativas y a adaptar esquemas de licenciamiento.

Y en el plano social, la banda de HF abre la posibilidad de comunicación para comunidades remotas y tradicionalmente desconectadas, otorgándoles autonomía y soberanía tecnológica, con un impacto directo y tangible. Por supuesto existen limitaciones propias de la tecnología: las bajas tasas de transmisión impiden aplicaciones de gran ancho de banda como videollamadas y streaming, lo que implica adoptar un estilo de comunicación asíncrona en lugar de interactividad instantánea. No obstante, esta restricción puede fomentar una comunicación más consciente, priorizando calidad sobre cantidad de información, lo que refuerza el sentido de apropiación comunitaria.

Los casos documentados en diversas regiones demuestran que la aceptación social depende en gran medida de la participación comunitaria en el diseño, la gestión y el mantenimiento de las estaciones. Más allá de la tecnología, el éxito de estas experiencias está en la apropiación local, la existencia de modelos económicos sostenibles y la integración de la conectividad en las dinámicas cotidianas de la población. La tecnología HF no solo debe ser vista como un medio técnico, sino también como un catalizador para el fortalecimiento organizativo y la soberanía tecnológica de las comunidades.

La HF no sustituirá la banda ancha, pero puede convertirse en una herramienta clave para salvar vidas, empoderar comunidades y servir como puente hasta la llegada de mejores alternativas de comunicación; ayuda a reducir la exclusión digital de quienes habitan en las zonas más apartadas. La colaboración será esencial para traducir este potencial en soluciones adaptadas a cada contexto, combinando avances técnicos con estrategias regulatorias.

Agradecimientos

A LACNIC por seleccionar este proyecto en el Programa Líderes 2025 y al Grupo de Investigación i2t de la Universidad Icesi, por apoyar todos los esfuerzos de conectividad rural en Colombia.

Referencias

AITC. (2014). *WB Govt to use ham radio to issue warnings to fishermen*. Obtenido de All India Trinamool Congress: https://aitcofficial.org/aitc/wb-govt-to-use-ham-radio-to-issue-warnings-to-fishermen/

ANE. (2022). *Actualización propuesta banda angosta para atención de emergencias y desastres en colombia*. Agencia Nacional del Espectro. Obtenido de https://www.ane.gov.co/Sliders/ANE2021/EspectroBandaAngostaEmergencias1.pdf

APC. (2025). *Brazilian Association of Digital Radio*. Obtenido de Association for Progressive Communications (APC): https://www.apc.org/en/users/abradig

Beltrán, D. (2024). Redes Comunitarias de Internet con el uso del Espectro IMT (International Mobile Telecomunications), una solución complementaria para el cierre de la brecha digital en Colombia en zonas rurales. Colombia. Obtenido de https://www.lacnic.net/innovaportal/file/7215/1/version-final-dana-beltran.docx.pdf

Bloom, P. (2021). *Radio HF: Guía para facilitadores e instaladores comunitarios*. Rhizomatica Communications, Oxaca, México. Obtenido de https://cnlearning.apc.org/wp-content/uploads/2023/12/Guia-Radio-HF-Digital-Final-ok.pdf

Collopy et al, A. (2020). *Indonesia National Disaster Preparedness Baseline Assessment*. Pacific Disaster Center. Obtenido de https://www.pdc.org/wp-content/uploads/NDPBA_IDN_Final_Report_English.pdf

CRC. (2009). *Decreto 963 de 2009*. Obtenido de Comisión de Regulación de Comunicaciones: https://normograma.crcom.gov.co/crc/compilacion/docs/decreto_0963_2009.htm

FAO. (2025). *Seguridad en la pesca*. Obtenido de Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura: https://www.fao.org/fishing-safety/risk-management/communication/es

Farallon Electronics. (2025). *PACTOR modems*. Obtenido de Farallon Electronics: https://farallon.us/pages/pactor-modems

Haynal, S. (2025). *HERMES SDR Project*. Obtenido de Hermes-Lite 2 Repository: https://github.com/softerhardware/Hermes-Lite2

Hinson, G. (2021). *FT8 Operating Guide*. Obtenido de ZL2iFB: https://www.g4ifb.com/FT8_Hinson_tips_for_HF_DXers.pdf

Isode. (2025). *Messaging Protocols for HF Radio*. Obtenido de Isode: Secure Messaging Software: https://www.isode.com/whitepaper/messaging-protocols-for-hf-radio/

Leeming, D. (2008). *The People First Network*. Obtenido de Leeming International Consulting: https://leeming-consulting.com/pfnet.htm

Madrinan, P., Rincon, D., & Navarro, A. (2019). Celgis Game: Viral Learning Experience with a Radio Planning Serious Game. *2019 International Conference on Virtual Reality and Visualization (ICVRV)*.

MAF. (2021). *MAF celebrates the power of radio in PNG on World Radio Day*. Obtenido de MAF: https://maf-uk.org/news/maf-celebrates-the-power-of-radio-in-png-on-world-radio-day/

MinTIC. (2025). *El 97,77% de las comunidades rurales participantes están interesadas por la banda de 900 MHz*. Obtenido de Sala de Prensa: https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Sala-de-prensa/Noticias/403146:El-97-77-de-las-comunidades-rurales-participantes-estan-interesadas-por-la-banda-de-900-MHz

MinTIC. (2025). *Permisos para el uso del Espectro Radioeléctrico a través de mecanismos de Selección Objetiva*. Obtenido de Ministerio de Tecnologías de la Información y Comunicaciones de Colombia: https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Tramites-y-servicios/Gestion-de-Espectro-Radioelectrico/4993:Permisos-para-el-uso-del-Espectro-Radioelectrico-a-traves-de-mecanismos-de-Seleccion-Objetiva

MinTIC Colombia. (2021). *Sistema de Banda Ciudadana*. Obtenido de Ministerio de Tecnologías de la Información y las Comunicaciones: https://www.mintic.gov.co/portal/inicio/Micrositios/RABCA-Radioaficionados-y-Banda-ciudadana/Banda-Ciudadana/

Orlova, A., & Veloso, A. (2020). *Towards a coherent and gender-inclusive approach for high frequency radio connectivity projects*. Obtenido de Global Information Society Watch: https://giswatch.org/node/6258

PSK Reporter. (2025). Obtenido de https://pskreporter.info/pskmap.html

Rhizomatica. (2020). *HERMES: High-frequency Emergency and Rural Multimedia Exchange System*. Obtenido de Rhizomatica: https://www.rhizomatica.org/hermes/

Rockwell Collins. (2014). *Modernized, High-Frequency Communications*. Obtenido de Rockwell Collins: https://www.rockwellcollins.com/~/media/Files/Unsecure/Products/Product%20Brochures/Communcation%20and%20Networks/Communication%20Radios/Modernized%20High-Frequency%20Communications%20brochure.aspx

Rural Development Volunteers Association. (2003). *People First Network: The Solomon Islands' Rural E-mail Network for Peace and Development*. Honiara. Obtenido de https://nsrc.org/regions/OCEANIA/SB/PFnet-WSIS-Paper-5-Jan-03.pdf

sBitx. (2025). Obtenido de sBitx: High Performance SDR: https://www.sbitx.net/

Sea-Tech Systems. (2023). *FCC approves change to amateur radio rules*. Obtenido de Sea-Tech Systems: https://seatech.systems/2023/12/31/fcc-approves-change-to-amateur-radio-rules-allowing-pactor4-use/?srsltid=AfmBOooUujo1AZx_xYWg-0EDnfhQtSH7RJS7u2LPfso_S4dIoQ4qkUBc

Sherrod, P. (s.f.). *The Winlink Radio Email Network*. Obtenido de Amateur Radio Safety Foundation, Inc.: https://philsherrod.com/Winlink/Winlink_for_EMCOMM.pdf

Suarkia, J. (2021). *HF Radio provides a sense of safety and protection for the Wuvulu community*. Obtenido de MAF Technologies: https://maftech.org/hf-radio-provides-a-sense-of-safety-and-protection-for-the-wuvulu-community/

Tal, D. (2025). *Current HF Bands Conditions: Charts for Radio Hams*. Obtenido de QLS: https://www.qsl.net/4x4xm/Propagation/Current-Ham-Band-Conditions.htm

The State of the World's Sea Turtles. (2012). *Two-Way Radios Save Turtles and Help Peruvian Fishermen*. SWOT Reports. Obtenido de https://www.seaturtlestatus.org/articl

es/2012/two-way-radios-save-turtles-and-help-peruvian-fishermen

UNESCO. (2014). *Community-based radio network for development and learning, Solomon Islands*. Obtenido de UNESCO Effective Literacy and Numeracy Practices Database: https://www.uil.unesco.org/en/litbase/community-based-radio-network-development-and-learning-solomon-islands

WinLink. (2025). Obtenido de WinLink: https://winlink.org/

WinLink. (2025). *ARDOP: Amateur Radio Digital Open Protocol*. Obtenido de WinLink: https://winlink.org/content/ardop_overview

WMO - Regional Training Institute, Pune. (s.f.). *Radio Wave Propagation Theory*. Obtenido de World Meteorological Organization - Regional Training Institute: https://imdpune.gov.in/training/communication/LN_11_60_Radio%20Wave%20Propagation%20Theory.pdf