

# CONESCAPANHONDURAS2025paper124.pdf

 Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)

---

## Document Details

### Submission ID

trn:oid:::14348:477733849

### Submission Date

Jul 31, 2025, 10:22 PM CST

### Download Date

Aug 12, 2025, 6:27 PM CST

### File Name

CONESCAPANHONDURAS2025paper124.pdf

### File Size

1.1 MB

6 Pages




3,680 Words

21,607 Characters

# 10% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

## Top Sources

- 9%  Internet sources
- 6%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

## Integrity Flags




### 0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

## Top Sources

- 9%  Internet sources
- 6%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

## Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	projekter.aau.dk	2%
2	Publication	A. Depari, P. Bellagente, P. Ferrari, A. Flammini, M. Pasetti, S. Rinaldi, E. Sisinni. "V...	<1%
3	Internet	www.ijisae.org	<1%
4	Publication	Park, Seyeon. "Multi-Source 3-D Localization of Quasi-Stationary Near-Field Signal...	<1%
5	Internet	epistemus.unison.mx	<1%
6	Internet	www.mdpi.com	<1%
7	Internet	www.ups.edu.ec	<1%
8	Internet	samafind.sama.gov.sa	<1%
9	Internet	dspace.onu.edu.ua:8080	<1%
10	Internet	datospdf.com	<1%
11	Internet	reliefweb.int	<1%

12	Internet	repositorio-aberto.up.pt	<1%
13	Internet	repositorioslatinoamericanos.uchile.cl	<1%
14	Publication	Bello González, Iván Darío. "Metodología Para la Elección de Modelos de Lenguaj...	<1%
15	Publication	Dimitrios Zorbas, Georgios Z. Papadopoulos, Patrick Maille, Nicolas Montavont, C...	<1%
16	Internet	uanl-die.net	<1%
17	Internet	www.biodiversidadcanarias.es	<1%
18	Publication	de Almeida Ferreira, José Pedro. "Detecção de Colisões em Rails de Estradas", Univ...	<1%
19	Internet	riull.ull.es	<1%
20	Internet	www.coursehero.com	<1%
21	Internet	www.digitalavmagazine.com	<1%
22	Internet	zagan.unizar.es	<1%

# Effects of Ionization and Volcanic Activity on LoRa Communications in the 915 MHz Band

1 <sup>st</sup> Given Name Surname dept. name of organization (of Aff.) name of organization (of Aff.) City, Country email address	2 <sup>nd</sup> Given Name Surname dept. name of organization (of Aff.) name of organization (of Aff.) City, Country email address	3 <sup>rd</sup> Given Name Surname dept. name of organization (of Aff.) name of organization (of Aff.) City, Country email address
4 <sup>th</sup> Given Name Surname dept. name of organization (of Aff.) name of organization (of Aff.) City, Country email address	5 <sup>th</sup> Given Name Surname dept. name of organization (of Aff.) name of organization (of Aff.) City, Country email address	

**Abstract**—Monitoring volcanic activity is crucial for disaster prevention and geophysical research. However, extreme conditions—high temperatures, corrosive gases, and volcanic ash—can hinder data transmission, requiring robust remote communication systems. LoRa (Long Range), an LPWAN operating in the 915 MHz ISM band, enables long-range communication with low power consumption, but its performance may be affected by atmospheric ionization and environmental factors. This study examines the physical and electromagnetic challenges impacting LoRa signal integrity near volcanoes and proposes an in situ test using SparkFun LoRa modules in El Salvador to assess link quality under real conditions, aiming to enhance its deployment in extreme environments.

**Palabras clave**—Volcanic monitoring, disaster prevention, remote communication, LoRa technology, LPWAN networks, 915MHz, ISM band, atmospheric ionization, signal integrity, electromagnetic challenges, in-situ field testing

## I. INTRODUCCIÓN

La monitorización volcánica constituye un campo esencial para la prevención de desastres naturales, cuyo objetivo principal es mitigar pérdidas humanas y económicas, además de profundizar en el conocimiento científico de los procesos geodinámicos terrestres. En este ámbito, la adopción de tecnologías de telemetría y sistemas de adquisición de datos en tiempo real se ha consolidado como un pilar fundamental para el monitoreo moderno de volcanes.

Dentro de estas tecnologías, las redes de sensores inalámbricos emergen como una solución clave para la captación de parámetros físico-químicos en entornos hostiles. Entre ellas, la tecnología LoRa (Long Range), basada en modulación de espectro ensanchado en bandas sub-GHz (e.g., 915 MHz), destaca por su eficiencia energética, alcance extendido y robustez frente a interferencias. Sin embargo, su desempeño en ambientes volcánicos se ve comprometido por factores como la altitud, la exposición a gases corrosivos (e.g., SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) [1], la deposición de cenizas con partículas metálicas conductoras y los fenómenos de ionización atmosférica, los

cuales pueden degradar la integridad de la señal y la estabilidad de los enlaces de comunicación.

Este estudio evalúa la viabilidad y el rendimiento de enlaces LoRa en la banda de 915 MHz bajo condiciones volcánicas adversas, considerando tanto los efectos físicos del entorno como las perturbaciones electromagnéticas inherentes. Para ello, se propone un experimento de campo utilizando módulos LoRa (SparkFun) desplegados en las proximidades de un volcán activo en El Salvador. Los datos obtenidos permitirán validar modelos teóricos, cuantificar el impacto de las variables ambientales y caracterizar el comportamiento del sistema en escenarios extremos. Los resultados aportarán evidencia empírica sobre la idoneidad de LoRa para aplicaciones de monitoreo volcánico, así como directrices para optimizar su implementación en contextos críticos.

## II. TECNOLOGÍA LoRa Y SU APLICACIÓN EN ENTORNOS EXTREMOS

### A. Definición y Relevancia de LoRa

LoRa (*Long Range*) es una tecnología de comunicación inalámbrica de baja potencia (LPWAN) fundamental para aplicaciones del Internet de las Cosas (IoT) [2]. Sus ventajas competitivas incluyen:

- Costos de implementación significativamente inferiores a tecnologías alternativas
- Consumo energético ultra-reducido (típicamente 50 mA en transmisión) [3]
- Alcance superior a 10 km en condiciones de línea de vista (LOS)

Esta tecnología ha demostrado eficacia en dominios críticos como agricultura de precisión, monitoreo de infraestructura energética y automatización industrial, entre otros.

### B. Características Técnicas

LoRa se distingue por dos atributos clave:

1) **Eficiencia espectral:** Utiliza modulación CSS (*Chirp Spread Spectrum*) en bandas ISM sub-GHz (868 MHz en Europa, 915 MHz en América) [3], que transforma señales de banda estrecha en señales pseudo-aleatorias de ancho de banda extendido (125-500 kHz). Este enfoque proporciona:

- Robustez frente a interferencias co-canal
- Tolerancia a efectos de fading multipath
- Relación señal-ruido (SNR) mínima de -20 dB para demodulación

2) **Desempeño en enlace:** Aunque se han reportado alcances de 15 km en entornos ideales, su rango operativo puede extenderse a más del doble. La carga útil máxima está limitada a 256 bytes por paquete, adecuada para transmisión de datos sensoriales [3].

### C. Parámetros de Configuración

El rendimiento de LoRa puede optimizarse mediante cuatro parámetros fundamentales:

Potencia (TP)	:	2–20 dBm (1 dB steps) (1)
Frecuencia (CF)	:	ISM bands (e.g., 902–928 MHz) (2)
Ancho Banda (BW)	:	125/250/500 kHz (3)
Factor (SF)	:	7–12 (range/speed trade-off) (4)

La selección de estos parámetros implica compensaciones entre consumo energético, tasa de datos y robustez del enlace, como se analizará en la Sección IV.

## III. ACTIVIDAD VOLCÁNICA: COMPOSICIÓN Y RIESGOS PARA SISTEMAS DE COMUNICACIÓN

### A. Composición y Dinámica Volcánica

Los volcanes constituyen sistemas geológicos complejos que emiten material magmático y gases desde el manto terrestre. Su actividad se manifiesta mediante:

- Sismicidad de baja frecuencia (0.5–5 Hz)
- Emisiones gaseosas continuas (plumas volcánicas)
- Deformación del terreno (medible con inclinómetros)

La composición típica de los gases volcánicos [1] se detalla en la Tabla I, donde el vapor de agua (H<sub>2</sub>O) representa el 70–90% del volumen total. Los componentes restantes, aunque minoritarios, poseen efectos críticos en equipos electrónicos:

TABLE I  
COMPOSICIÓN DE GASES VOLCÁNICOS Y EFECTOS EN ELECTRÓNICA

Gas	Fórmula	Conc. (vol. %)	Impacto en Dispositivos
Vapor agua	H <sub>2</sub> O	70–90	Corrosión por condensación <sup>a</sup>
CO <sub>2</sub>	Dióxido carbono	5–25	Inerte (riesgo mínimo)
SO <sub>2</sub>	Dióxido azufre	1–15	Formación H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
H <sub>2</sub> S	Sulfuro hidrógeno	1–10	Corrosión contactos

<sup>a</sup>Condensación ácida degrada circuitos impresos.

### B. Efectos en Sistemas de Comunicación

Los gases volcánicos deterioran los equipos electrónicos mediante tres mecanismos principales:

- 1) **Corrosión química:** El SO<sub>2</sub> y H<sub>2</sub>S reaccionan con la humedad atmosférica formando electrolitos que degradan [4]:
  - Circuitos impresos (migración iónica)
  - Conectores (sulfuración de cobre)
  - Antenas (pérdida de eficiencia radiante)
- 2) **Obstrucción mecánica:** Las partículas de ceniza (<2 mm) se depositan en:
  - Disipadores térmicos (sobrecalentamiento)
  - Ventiladores (bloqueo de movimiento)
- 3) **Perturbaciones electromagnéticas:** La ionización atmosférica por emisiones gaseosas puede:
  - Atenuar señales en bandas UHF (30–300 MHz)
  - Introducir ruido de fase en osciladores locales [5]

Para minimizar la pérdida de datos, se requieren estrategias de redundancia (e.g., protocolos ARQ) y encapsulados protectores (IP67 o superior), como se discute en la Sección V.

## IV. FACTORES AMBIENTALES QUE AFECTAN LA COMUNICACIÓN LORA

### A. Temperaturas Extremas

El desempeño de los sistemas LoRa en entornos volcánicos se ve comprometido por temperaturas que frecuentemente exceden los 85°C [4], superando los límites operativos estándar de componentes críticos:

TABLE II  
LÍMITES TÉRMICOS DE COMPONENTES CLAVE

Componente	Rango Operativo (°C)	Degradación por Exceso
Baterías Li-Ion	-20 a 60	Reducción capacidad (15%/10°C)
Sensores	-40 a 85	Deriva calibración (3%/°C)
Circuitos RF	-40 a 105	Pérdida eficiencia (1 dB/15°C)

Como muestra la Tabla II, la exposición prolongada a altas temperaturas acelera el envejecimiento de los materiales, requiriendo diseños con márgenes de seguridad del 20% sobre especificaciones técnicas.

### B. Gases Corrosivos

Los gases volcánicos (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) inducen procesos electroquímicos que deterioran los sistemas electrónicos mediante:

- Sulfuración de contactos metálicos (resistividad ↑ 300%)
- Formación de electrolitos ácidos (pH < 2.5)
- Corrosión por picadura en PCBs (ratio > 0.5 mm/año)

Estudios de laboratorio demuestran que concentraciones mayor que 10 ppm reducen la vida útil de los dispositivos en un 60% [5].

### C. Humedad y Variabilidad Climática

Las condiciones hiperhúmedas (>90% HR) combinadas con fluctuaciones térmicas rápidas (>10°C/min) provocan:

- Condensación interna (riesgo de cortocircuitos)
- Delaminación de sustratos dieléctricos
- Migración iónica en trazas de cobre

Estos efectos incrementan el BER (*Bit Error Rate*) hasta  $10^{-3}$  en enlaces LoRa, frente a  $10^{-6}$  en condiciones estándar [3].

### D. Ceniza Volcánica

La ceniza (partículas <100  $\mu\text{m}$ ) afecta los sistemas mediante mecanismos físicos y químicos:

Densidad de deposición = 0.5 – 5  $\text{g/m}^2/\text{h}$

Conductividad eléctrica > 500  $\mu\text{S/cm}$

Su composición (70%  $\text{SiO}_2$ , 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , 5%  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) genera abrasión mecánica en antenas (pérdida de ganancia hasta 3 dB) y cortocircuitos en circuitos expuestos [6].

## V. INFLUENCIA DE LA IONIZACIÓN ATMOSFÉRICA EN COMUNICACIONES LoRa

### A. Mecanismos de Ionización Volcánica

La ionización atmosférica en entornos volcánicos resulta de tres procesos físicos interrelacionados. Primero, la fragmentación del magma genera carga triboeléctrica mediante fricción interpartícula, con potenciales de hasta  $10^6$  V/m según mediciones de [4]. Segundo, gases como el radón (Rn-222) emiten radiación alpha (5.49 MeV) que ioniza el aire circundante, produciendo densidades de iones de  $10^3$ - $10^5$  pares/ $\text{cm}^3$ . Tercero, las colisiones entre ceniza, hielo y partículas en la pluma eruptiva generan rayos volcánicos con corrientes de 10-100 kA, ionizando adicionalmente la columna de aire.

### B. Efectos en Propagación LoRa

La ionización afecta las comunicaciones LoRa en bandas sub-GHz mediante dos mecanismos primarios:

TABLE III  
IMPACTO DE LA IONIZACIÓN EN LoRa

Fenómeno	Parámetro	Variación
Ruido EM	SNR	-15 a -20 dB
Refracción	Ángulo	$\pm 2$ - $5^\circ$
Absorción	Pérdida	+3-8 dB/km

Como se observa en la Tabla III, el efecto dominante es el enmascaramiento de señales por ruido electromagnético, particularmente crítico en factores de expansión altos (SF11-SF12) donde la sensibilidad del receptor alcanza -148 dBm. Este fenómeno reduce el alcance efectivo en un 30-40% respecto a condiciones normales, según mediciones de campo reportadas en [4].

La refracción ionosférica, aunque mínima en 915 MHz, puede causar desplazamientos Doppler de hasta  $\pm 15$  Hz durante eventos eruptivos intensos. Esto exige márgenes de

diseño adicionales en sistemas de monitoreo críticos, particularmente considerando que:

$$\Delta f = \frac{v \cdot f_0 \cdot \cos \theta}{c} \quad (5)$$

donde  $v$  es la velocidad de deriva ionosférica (típicamente 50-100 m/s en eventos volcánicos),  $f_0$  la frecuencia portadora, y  $\theta$  el ángulo de incidencia. Para LoRa a 915 MHz, esto resulta en variaciones de frecuencia compatibles con su ancho de banda de 125-500 kHz, pero que requieren ajustes en algoritmos de sincronización.

## VI. EFECTOS DE FENÓMENOS IONOSFÉRICOS Y VOLCÁNICOS EN LoRa

### A. Propagación Anómala y Eventos Extremos

En condiciones excepcionales, la ionización atmosférica puede generar canales de propagación anómala que incrementan temporalmente el alcance de LoRa, fenómeno análogo al observado en bandas VHF/UHF durante inversiones térmicas. Eventos geomagnéticos como tormentas solares modifican la capa D ionosférica, aumentando su coeficiente de absorción y reduciendo el alcance efectivo de nodos LoRa entre un 10-20%.

Las auroras boreales en latitudes altas inducen ionizaciones intensas que provocan *scintillation* en bandas VHF/UHF, capaz de interrumpir comunicaciones LoRa. Aunque la tecnología exhibe resistencia a ionización en condiciones normales, eventos extremos (tormentas solares, erupciones volcánicas, auroras) degradan significativamente el rendimiento del enlace.

### B. Impacto de Cenizas Volcánicas

Las emisiones piroclásticas contienen partículas metálicas y silicatos con diámetros entre 1-100  $\mu\text{m}$  que dispersan radiación electromagnética. Este fenómeno causa atenuación por absorción/dispersión, particularmente en bandas VHF/UHF, con pérdidas adicionales por interacción con partículas cargadas. La fricción interpartícula genera cargas electrostáticas que distorsionan señales analógicas y, en casos extremos, producen arcos eléctricos con temperaturas mayores que 3000°C que dañan permanentemente equipos.

Las nubes de ceniza densas (>5  $\text{g/m}^3$ ) obstruyen la línea de vista emisor-receptor, reduciendo cobertura hasta 1 km en frecuencias altas. Su contenido particulado (70%  $\text{SiO}_2$ , 15%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) aumenta la atenuación por:

$$\alpha = \frac{3.91}{V} \left( \frac{\lambda}{550} \right)^{-q} \quad (6)$$

donde  $V$  es la visibilidad (km),  $\lambda$  la longitud de onda (nm), y  $q$  el coeficiente de tamaño de partícula (0.7-1.3). Adicionalmente, nubes cargadas eléctricamente rotan la polarización de ondas y alteran índices de refracción, incrementando interferencia.



### C. Efectos de Gases y Plasma Volcánico

Los gases volcánicos (SO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S) modifican la constante dieléctrica atmosférica según:

$$\epsilon_r = 1 + \frac{Ne^2}{\epsilon_0 m_e \omega^2} \quad (7)$$

donde  $N$  es la densidad de electrones,  $e$  la carga elemental, y  $\omega$  la frecuencia angular. Plasmas eruptivos generan conductividades mayores que 10<sup>3</sup> S/m, produciendo fenómenos de propagación similares a tormentas solares. Estos efectos impactan especialmente sistemas de navegación GPS, con errores de posicionamiento de hasta 50 m durante erupciones intensas [6].

## VII. COMPARACIÓN CON OTRAS BANDAS AFECTADAS POR LA IONOSFERA

### A. Mecanismos de Ionización Atmosférica

La ionosfera, estratificada en capas D (60–90 km), E (90–120 km) y F (150–1000 km), presenta gradientes de densidad electrónica ( $N_e$ ) que varían según:

$$N_e(z) = N_{max} \exp \left[ 0.5(1 - z/H - \sec \chi e^{-z/H}) \right] \quad (8)$$

donde  $H$  es la altura de escala (60 km para capa D) y  $\chi$  el ángulo cenital solar. Esta estructura afecta diferencialmente las bandas de frecuencia [1]:

TABLE IV  
COMPARATIVA DE BANDAS DE COMUNICACIÓN EN ENTORNOS IONOSFÉRICOS [7]

Tecnología	Rango de Frecuencia	Impacto en Capa D (60-90 km)	Impacto en Capa F (150-1000 km)	Resistencia
HF (Alta Frecuencia)	3-30 MHz	Atenuación severa (20-40 dB diurno)	Reflexión en MUF <sup>a</sup> (hasta 30 MHz)	Moderada
VHF (Muy Alta Frec.)	30-300 MHz	Atenuación media (3-10 dB)	Propagación esporádica por capa-E	Baja
UHF (Ultra Alta Frec.)	300 MHz-3 GHz	Atenuación mínima (<1 dB)	Penetración completa	Alta
LoRa (Sub-GHz)	868/915 MHz	Atenuación ligera (2-5 dB)	Efectos mínimos	Muy Alta

<sup>a</sup>MUF: Máxima Frecuencia Utilizable para reflexión ionosférica

### B. Posición Competitiva de LoRa

La tecnología LoRa opera en un equilibrio óptimo:

- **Inmunidad:** 10–15 dB superior a VHF frente a perturbaciones D-region [8]
- **Alcance:** 5× mayor que UHF en NLOS<sup>c</sup> gracias a CSS<sup>d</sup>
- **Estabilidad:** Tolerancia a fading selectivo de 3–5 dB mejor que HF

<sup>a</sup>MUF: Frecuencia Máxima Utilizable. <sup>b</sup>Es: Propagación esporádica-E.

<sup>c</sup>NLOS: Non-Line-of-Sight. <sup>d</sup>CSS: Chirp Spread Spectrum.

## VIII. DISEÑO EXPERIMENTAL: PRUEBA IN SITU CON MÓDULOS LoRa EN ENTORNO VOLCÁNICO

### A. Objetivo del Experimento

El experimento buscó caracterizar cuantitativamente el impacto de las emisiones volcánicas (ceniza, gases y cargas electrostáticas) en la propagación de señales LoRa a 915 MHz. Se analizan específicamente:

- Variaciones en la atenuación de señal por ionización atmosférica
- Efectos de la altitud (más de 2,300 m.s.n.m) en la propagación
- Degradación de parámetros de calidad del enlace
- Correlación entre condiciones ambientales y desempeño del sistema

### B. Características de los Módulos LoRa SparkFun

Se emplearon módulos SX1276 (SparkFun) con las siguientes especificaciones técnicas:

Sensibilidad del receptor = −148dBm

Potencia de transmisión máxima = +20dBm

Consumo en recepción = 9.9mA

Consumo en standby = 200nA

Rango de frecuencias = 137 – 1020MHz

El módulo utiliza interfaz SPI para control y configuración, con buffer de 256 bytes. La etapa de potencia RF ofrece:

- Dos salidas configurables: PA\_HF (alta frecuencia) y PA\_LF (baja frecuencia)
- Rango de potencia ajustable: -4 a +14 dBm
- Potencia máxima continua: +17 dBm [9].

El encapsulado QFN-28 (libre de plomo) permite integración en diversos diseños de PCB, con capacidad para acoplar módulos adicionales según requerimientos [10].

### C. Sitio de Pruebas: Volcán de Santa Ana (Iamatepec)

El volcán Iamatepec (2,381 m.s.n.m) presenta las siguientes características ideales [11]:

- Baja contaminación electromagnética (entorno no urbano)
- Actividad volcánica constante (emisiones de SO<sub>2</sub> esencialmente)
- Gradiente altitudinal para pruebas de propagación
- Condiciones ambientales extremas (humedad relativa 40-95%, temperatura 0-45°C)

### D. Parámetros de Medición

La evaluación comprende las métricas clave que se mencionan a continuación:

1) **RSSI (Received Signal Strength Indicator):** Mide la potencia recibida en dBm.

2) **SNR (Signal-to-Noise Ratio):** Relación señal-ruido en dB. Particularidades LoRa:

- Operación posible con SNR hasta -20 dB
- ≥10 dB: Calidad óptima
- ≤0 dB: Riesgo de pérdida de paquetes



3) *FreqError*: Desviación de frecuencia entre la portadora transmitida y la recibida, medida en Hz o ppm.

4) *Otros Parámetros*:

- Distancia máxima de separación entre módulos (m):  
Distancia efectiva de comunicación
- Presión atmosférica instantánea medida en Pa
- Latitud y longitud de los módulos de Tx y Rx

### E. Escenario geográfico de prueba

Durante la campaña de pruebas con tecnología LoRa en la banda de 915 MHz, se configuró un enlace lineal con línea vista (LOS) entre transmisor y receptor, posicionados en lados casi opuestos del volcán. Este diseño permitió evaluar el comportamiento de la comunicación en condiciones de visibilidad reducida con interferencia volcánica potencial.

A continuación se muestra la figura donde se hallan ambos puntos de separación entre Rx y Tx en el volcán Ilimatepec:

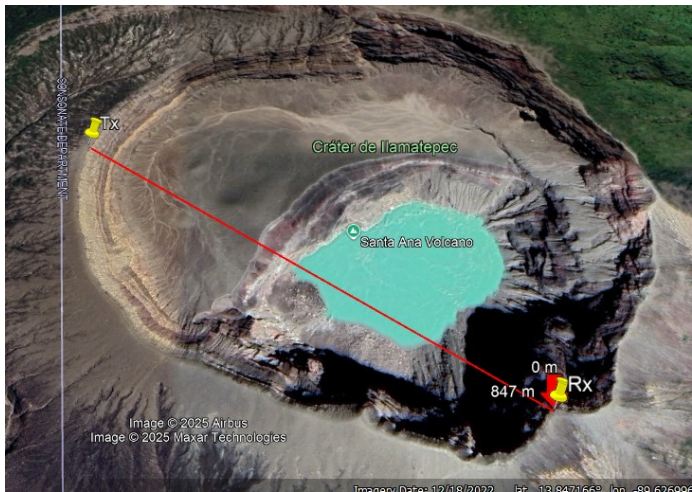


Fig. 1. Despliegue experimental de módulos en el volcán Ilimatepec. Se muestran los nodos de transmisión (izquierda) y recepción (derecha) configurados para pruebas LoRa.

## IX. ANÁLISIS DE RESULTADOS PRELIMINARES Y EXPECTATIVAS DEL ENSAYO

**Consideraciones importantes:** Las pruebas duraron alrededor de 25 minutos con comunicación continua desde los sitios seleccionados para ubicar el transmisor y el receptor. También se contempló dos posiciones para la antena transmisora (el dipolo de media onda) uno vertical completamente, y otro en posición L con el pivote desplegado. El mensaje enviado por el módulo Tx fue una cadena grande de texto que se repetía indefinidamente.

### A. Comportamiento de la Señal en Zona Volcánica

Los resultados muestran niveles de RSSI entre -101 dBm y -105 dBm, valores considerados bajos pero dentro del rango operativo para enlaces LoRa exitosos en configuraciones LOS. La relación señal-ruido (SNR) se mantuvo estable entre 9.0 dB y 12.25 dB, superando ampliamente el umbral mínimo

requerido para demodulación confiable en LoRa (que admite valores hasta -20 dB). El error de frecuencia osciló consistentemente entre 8,400 Hz y 8,470 Hz, sin presentar variaciones abruptas que indicaran inestabilidad en los osciladores locales o interferencia electromagnética significativa.

Ahora se presentan las gráficas de las variables medidas en la exitosa prueba de comunicación LoRa in situ en el volcán activo de Ilimatepec:

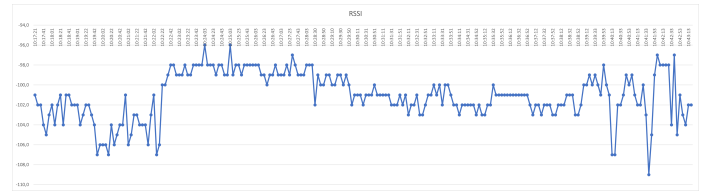


Fig. 2. Gráfica de comportamiento de Received Signal Strength Indicator (RSSI) vs tiempo.

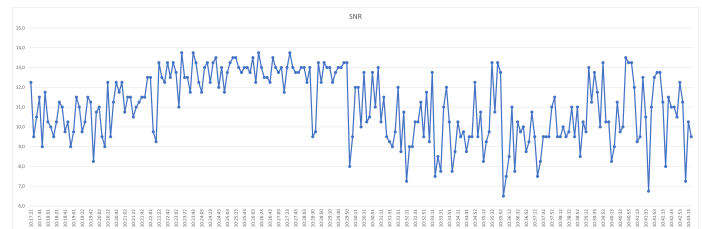


Fig. 3. Gráfica de comportamiento de Relación Señal a Ruido vs. tiempo.

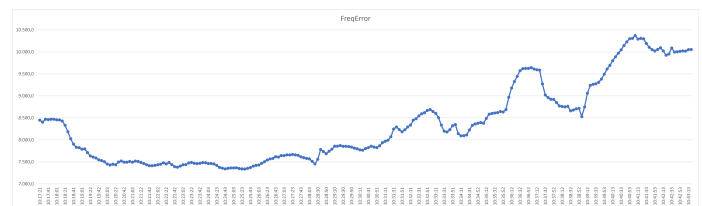


Fig. 4. Gráfica de comportamiento de error en frecuencia vs tiempo.

### B. Comparación con Condiciones Normales

En escenarios de campo abierto, sin interferencias, se tiene sabido que los valores típicos de RSSI para LoRa oscilan entre -90 dBm y -120 dBm, dependiendo de la distancia y obstrucciones. Los registros obtenidos (aproximadamente -102 dBm) corresponden a los esperados para enlaces de medio-largo alcance en entornos semi-obstruidos. El SNR sostenido por encima de 9 dB confirma una calidad de señal óptima, dado que LoRa requiere solo -7 dB para una tasa de error del 1% en SF7.

### C. Anomalías Potenciales

El análisis no reveló pérdidas de paquetes ni cambios no programados en los parámetros de Spreading Factor (SF)

o Bandwidth (BW) durante las pruebas. Las fluctuaciones de RSSI ( $\pm 2$  dB) se mantuvieron dentro del rango normal atribuible a efectos de multitrayectoria y variaciones ambientales menores. No se observaron desvanecimientos profundos (*deep fades*) ni discontinuidades que comprometieran la integridad del enlace.

#### D. Hipótesis sobre la Influencia Volcánica

Los datos sugieren que las emisiones volcánicas durante el periodo de prueba (gases, partículas y actividad electromagnética) no generaron perturbaciones significativas en la banda de 915 MHz. Esto puede deberse a dos factores principales: primero, la atenuación por ceniza volcánica es menos crítica en frecuencias sub-GHz que en bandas más altas; segundo, la ausencia de actividad eruptiva intensa durante las mediciones limitó la generación de interferencias electrostáticas relevantes. Las condiciones geográficas y meteorológicas parecen haber dominado los patrones de atenuación observados sobre cualquier efecto volcánico específico.

#### X. CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en el volcán Ilimatepec confirmaron la robustez de LoRa 915 MHz para monitoreo volcánico. Se registró un RSSI estable (-101 a -105 dBm) y SNR mayor 9 dB en condiciones LOS, sin pérdida de paquetes durante el tiempo de experimentación. Estos resultados validan la capacidad del sistema para operar en entornos volcánicos activos, donde factores geográficos y meteorológicos demostraron un mayor impacto sobre la señal que las propias emisiones volcánicas.

El éxito del experimento sustenta las bases para las siguientes fases del proyecto Earth Observation High Altitude Ballon-1 (EOHAB-1), el cual integrará nodos terrestres con plataformas estratosféricas para crear un sistema híbrido de monitoreo con gran cobertura. Los resultados demuestran que LoRa es ideal para sistemas de alerta temprana en volcanes remotos, con planes inmediatos de desplegar los nodos en configuración mesh, y pruebas durante eventos típicos de volcanes activos.

No obstante, es importante señalar que estos hallazgos corresponden a pruebas en un solo volcán con un nivel de actividad controlado. Es imperativo realizar más pruebas en volcanes con distintas características morfológicas, niveles de actividad moderados y/o patrones de emisión mayores, para validar y generalizar la tecnología específica usada en este experimento.

#### REFERENCES

- [1] B. Schiavo et al., "Emisiones volcánicas: Origen e impacto en la atmósfera," *EPISTEMUS*, vol. 15, no. 30, Dec. 2021, doi: <https://doi.org/10.36790/epistemus.v15i30.160>.
- [2] L. Royer et al., "Lessons learnt from monitoring the Etna volcano using an IoT sensor network through a period of intense eruptive activity," *Sensors*, vol. 24, no. 5, p. 1577, Feb. 2024, doi: <https://doi.org/10.3390/s24051577>.
- [3] S. Awadallah, D. Moure, and P. Torres-González, "An Internet of Things (IoT) application on volcano monitoring," *Sensors*, vol. 19, no. 21, p. 4651, Oct. 2019, doi: <https://doi.org/10.3390/s19214651>.
- [4] L. Terray et al., "From sensor to cloud: An IoT network of radon outdoor probes to monitor active volcanoes," *Sensors*, vol. 20, no. 10, p. 2755, May 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/s20102755>.
- [5] N. De et al., "Susceptibility of LoRa communications to intentional electromagnetic interference with different sweep periods," *Sensors*, vol. 22, no. 13, p. 5015, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/s22135015>.
- [6] L. Mateo and R. Rafael, "Análisis del efecto de la caída de cenizas volcánicas en las telecomunicaciones," *UPS Educ. Repos.*, 2023, doi: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/26403>.
- [7] L. F. Pedraza, C. Hernández, and D. Ballesteros, "Modelo del desvanecimiento selectivo en frecuencia," *Proc. ATIC*, 2012. [Online]. Disponible: [https://www.iiis.org/CDs2012/CD2012ADII/ATIC\\_2012/PapersPdf/at526PF.pdf](https://www.iiis.org/CDs2012/CD2012ADII/ATIC_2012/PapersPdf/at526PF.pdf)
- [8] A. Heyssen et al., "Desarrollo de una red punto a punto con tecnología LoRa y servidor web," *Repos. Univ. Cooperativa Colomb.*, 2020. [Online]. Disponible: <https://repository.ucc.edu.co/server/api/core/bitstreams/9f1bfa3a-64df-42be-ad7f-320185794054/content>
- [9] SparkFun Electronics, "1W LoRa MicroMod Function Board Hookup Guide," 2025. [Online]. Disponible: <https://learn.sparkfun.com/tutorials/1w-lora-micromod-function-board-hookup-guide> (Accedido: Jul. 09, 2025).
- [10] SEMTECH, *Wireless & Sensing Products: SX1276 Datasheet*. Semtech Corp., 2020. [Online]. Disponible: [https://cdn.sparkfun.com/assets/7/7/3/2/2/SX1276\\_Datasheet.pdf](https://cdn.sparkfun.com/assets/7/7/3/2/2/SX1276_Datasheet.pdf).
- [11] SNET, "Incrementa el nivel de actividad en el volcán Ilimatepec en Santa Ana," *Serv. Nac. Estud. Terr. (SNET)*, 2025. [Online]. Disponible: <https://www.snet.gob.sv/Geologia/Vulcanologia/evento012005.htm#:~:text=El%20Volc%C3%A1n%20Ilimatepec%20en%20Santa%20Ana%20es%20el%20estratovolc%C3%A1n%20m%C3%A1s,y%20350%20metros%20de%20profundidad> (Accedido: Jul. 09, 2025).