



UNIDAD ACADÉMICA DE INGENIERÍA, INDUSTRIA CONSTRUCCIÓN

CARRERA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

TRABAJO DE TITULACIÓN, MODALIDAD PROYECTO TÉCNICO

TÍTULO:

“RED INTELIGENTE DE ANÁLISIS MAGNETOTELÚRICO, SÍSMICO Y
ENERGÉTICO PARA EL MONITOREO INTEGRAL DE SMART CITIES”

AUTOR:

ARTEAGA PACHAY EDUARDO NICEFORO

ASESOR ACADÉMICO:

ING. CARLO ALONSO CANO GORDILLO, MG

MANTA -MANABÍ– ECUADOR

AGOSTO – 2026

Certificación del tutor

En calidad de docente tutor de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Laica “Eloy Alfaro” de Manabí, certifico:

Haber dirigido y revisado el trabajo de titulación bajo la modalidad de proyecto técnico, bajo la autoría del estudiante Arteaga Pachay Eduardo Nicéforo legalmente matriculado en la carrera de Ingeniería Eléctrica, cuyo tema de proyecto es Red inteligente de análisis magnetoteléutico, sísmico y energético para el monitoreo integral de Smart cities.

El presente proyecto ha sido desarrollado de acuerdo con los lineamientos internos de la modalidad en mención y en apego al cumplimiento de los requisitos exigidos por el Reglamento de Régimen Académico, por tal motivo CERTIFICO, que el mencionado proyecto reúne los méritos académicos, científicos y formales, suficientes para ser sometido a la evaluación del tribunal de titulación que designe la autoridad competente.

Particular que certifico para los fines consiguientes, salvo disposición de Ley en contrario.

Manta, agosto del 2026.

Lo certifico,



ING. CARLO ALONSO CANO GORDILLO, MG

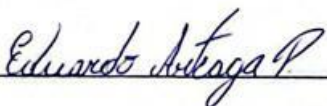
Docente Tutor

Declaración de autoría

La responsabilidad de este proyecto de titulación Red inteligente de análisis magnetoteléurico, sísmico y energético para el monitoreo integral de Smart cities corresponde exclusivamente a Arteaga Pachay Eduardo Nicéforo con C.I.: 1315236644. Eximo a la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, y a sus representantes legales, de posibles reclamos o acciones legales. Además, certifico que las ideas, opiniones, resultados y conclusiones vertidas en este proyecto de tesis son exclusividad del autor.

Adicionalmente, cedo los derechos de este trabajo a la Universidad Laica "Eloy Alfaro" de Manabí, para que forme parte de su patrimonio de propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y trabajos de titulación, ya que ha sido realizado con apoyo académico e institucional de la universidad.

Manta, agosto de 2026



Arteaga Pachay Eduardo Nicéforo

Autor



Ing. Carlo Alonso Cano Gordillo, MG

Asesor académico

Dedicatoria

Dedico este gran logro principalmente a mi madre, mi ángel en el cielo y mi amiga incondicional, sin su motivación y sin sus consejos no lo habría logrado, su bendición a lo largo de mi vida me ha protegido y me ha formado como una persona de bien. Por eso le entrego mi trabajo como fruto de lo que me inculcó y como ofrenda por toda su paciencia, amor y sabiduría madre, te amo en esta y todas las vidas, porque nuestro amor trasciende a la eternidad.

Agradecimiento

Agradezco a Dios porque en todo momento él ha sido bueno, y me ha bendecido en este camino permitiéndome llegar hasta aquí.

A mi familia porque han sido parte de mi motivación y me han dado aliento cuando caigo.

A mi esposa, Melanita, quien ha sido mi ayuda idónea y nunca ha soltado mi mano.

Y a cada uno de los profesores que me han educado a lo largo de este camino, en especial al Ing. Carlo Alonso Cano Gordillo, por ser mi guía.

Arteaga Pachay Eduardo Nicéforo

Resumen

El presente trabajo propone el diseño e implementación de una Red Inteligente de Análisis magnetotelúrico, sísmico y energético para el Monitoreo Integral de Smart Cities, se centró en el desarrollo de un sistema capaz de registrar, procesar y visualizar señales electromagnéticas naturales de la superficie terrestre por medio del método magnetotelúrico. La investigación integro los fundamentos físicos relacionados por las señales de los campos eléctricos y magnéticos producidos por los vientos solares y tormentas eléctricas, esas señales son recolectadas y procesadas dentro de la tarjeta Raspberry Pi.

El sistema abarca con los electros no polarizados y la bobina magnética o también llamadas magnetómetro, la cual su función principal es la recolección de magnitudes físicas de los campos eléctricos y magnéticos, donde son procesados mediante la Transformada Rápida de Fourier (FFT), para obtener las variables que nos ayudara al análisis, la cual tenemos la impedancia, resistividad aparente y la fase.

La información obtenida se utilizó para generar modelos geofísicos del subsuelo, contribuyendo a la caracterización de estructuras geológicas, zonas de fractura y cambios en la resistividad eléctrica como soporte para estudios geológicos y de evaluación del comportamiento sísmico.

Además, se desarrolló una interfaz web basada en HTML que permitió la visualización gráfica e intuitiva los datos adquiridos en tiempo real y las principales variables claves del sistema, de esa manera se facilitó el monitoreo continuo y análisis de la información generada por el equipo. Esta plataforma básicamente es una herramienta que nos ayuda al monitoreo y seguimiento de los datos.

El proceso de esta investigación va más allá de la construcción del equipo magnetotelúrico, ya que integral información del estudio del origen de las señales electromagnéticas naturales, el diseño del sistema de registro o adquisición, el procesamiento digital de las señales, la explicación geofísica de los resultados y la implementación de una plataforma de visualización para el monitoreo de la información obtenidas. De esta manera, el proyecto pretendió proporcionar una solución tecnológica de bajo costo y adaptable para el seguimiento de investigaciones geofísicas, energética y científica en el contexto de Smart Cities.

Palabras clave: Magnetotelúrica, Raspberry Pi, Impedancia Magnetotelúrica, Resistividad Aparente, HTML.

Abstract

This work proposes the design and implementation of an Intelligent Network for magnetotelluric, seismic, and energy analysis for the comprehensive monitoring of Smart Cities. It focuses on the development of a system capable of recording, processing, and visualizing natural electromagnetic signals from the Earth's surface using the magnetotelluric method. The research integrates the physical principles related to the electric and magnetic field signals produced by solar winds and electrical storms. These signals are collected and processed within the Raspberry Pi board.

The system includes non-polarized electrodes and a magnetic coil, also called a magnetometer, whose main function is to collect physical magnitudes of electric and magnetic fields. These are then processed using the Fast Fourier Transform (FFT) to obtain variables that will aid in the analysis, such as impedance, apparent resistivity, and phase. The information obtained was used to generate geophysical models of the subsurface, contributing to the characterization of geological structures, fracture zones, and changes in electrical resistivity, thus supporting geological studies and seismic behavior assessments.

In addition, an HTML-based web interface was developed that allowed for the intuitive and graphical visualization of the acquired data in real time and the system's main key variables. This facilitated the continuous monitoring and analysis of the information generated by the equipment. This platform is essentially a tool that helps us monitor and track the data.

The research process goes beyond the construction of the magnetotelluric equipment, as it integrates information from the study of the origin of natural electromagnetic signals, the design of the recording or acquisition system, the digital processing of the signals, the geophysical explanation of the results, and the implementation of a visualization platform for monitoring the obtained information. In this way, the project aimed to provide a low-cost and adaptable technological solution for monitoring geophysical, energy, and scientific research within the context of Smart Cities.

Keywords: Magnetotelluric, Raspberry Pi, Magnetotelluric Impedance, Apparent Resistivity, HTML.

Índice

Resumen	vi
Abstract	viii
Introducción	1
1. Capítulo I: El problema.....	3
1.1 Antecedente	3
1.2 Justificación	4
1.3 Propuesta.....	4
1.4 Problema de investigación.....	5
1.6 Campo de acción.....	5
1.7 Hipótesis	5
1.8 Objetivos.....	6
1.8.1 Objetivo general	6
1.8.2 Objetivo específico	6
1.9 Variables	7
2. Capítulo II: Marco Teórico	8
2.1 Geofísica	8
2.1.1 Historia de la geofísica	8
2.1.2 Desarrollo de la Geofísica	9
2.1.3 Métodos estudios del subsuelo	10
2.1.3.1. Método sísmico.....	10
2.1.3.2. Método eléctrico	11
2.1.3.3. Método georradar.....	12
2.1.3.4. Métodos potenciales	12

2.1.3.5. Métodos electromagnéticos	13
2.2 Método Magnetotelúrico	14
2.2.1 Historia del método magnetotelúrico.....	14
2.3 Principios físicos del método.....	15
2.3.1. Inducción electromagnética	16
2.3.2 Campos electromagnéticos naturales.....	18
2.3.2.1. Campo geomagnético	18
2.3.2.2. Origen del campo geomagnético	19
2.3.2.3. Viento Solar	20
2.3.2.4. La magnetosfera.....	22
2.3.2.5. La ionosfera	23
2.3.2.6. Descargas atmosféricas.....	25
2.3.2.7. ¿Cuál es el origen de las descargas eléctricas?	26
2.3.4 Ondas electromagnéticas	27
2.3.4.1 Campo primario y secundario.....	29
2.3.4.2. Corriente telúrica	31
2.3.4.3. Skin Depth	31
2.3.4.4. Impedancia.....	33
2.3.4.5. Ecuaciones de Maxwell	33
2.3.4.6. Ley de Ampere	34
2.3.4.7. Ley de Faraday (Inducción Electromagnética).....	34
2.3.4.8. Ley de Gauss para campo eléctrico	35

2.3.4.9. Ley de Gauss para campo magnético	35
2.3.4.10. Cálculo de la resistividad aparente y la fase	35
2.3.4.11. Interpretación de los valores de resistividad.....	36
3. Capítulo III: Diseño de Proyecto	38
3.1 Tipo y enfoque de investigación.....	38
3.2 Área de estudio	38
3.3. Arquitectura general del sistema	39
3.3.1 Arquitectura por capas.....	42
3.3.2 Conexiones eléctricas	44
3.3.3 Instalación y disposición de los sensores en campo	46
3.4 Materiales y equipos utilizados	47
3.4.1. Electrodo no polarizado	47
.....	48
3.4.2. Magnetómetro fluxgate triaxial Bartington Mag649FL	48
3.4.3. Raspberry Pi 4.....	49
3.4.4. Convertidores analógico-digitales (A/D) ADS1256.....	50
3.4.5. Adafruit ultimate gps hat	52
3.4.6. Sensor de movimiento MPU9250.....	53
3.4.7. Cable jumper (Dupont).....	54
3.4.8. Ventilador de refrigeración.....	55
3.4.9. Fuente de alimentación.....	55
3.4.10. Router y sistema de Internet	56

3.5 Procesamiento, almacenamiento y visualización de datos	57
3.6 Flujo de procesamiento magnetotelúrico	61
4. Capítulo IV: Resultados y análisis	67
4.1 Preparación del terreno e instalación de los sensores	68
4.2 Montaje del sistema magnetotelúrico en campo.....	70
4.3 Resultados de las señales eléctricas y magnéticas	71
4.4 Resultados obtenidos mediante la plataforma desarrollada.....	72
4.5 Discusión de resultados	73
Conclusión	74
Recomendaciones	75
Bibliografía.....	75
Anexos.....	81

Introducción

Hoy en día sabemos que las ciudades son importantes para el desarrollo de una nación, donde el tema de educación, salud, y economía sigue en aumento, dentro de los registros del año 2008 se tiene calculo que más de 3300 millones de personas viven dentro de las zonas urbanas en la cual si la tendencia sígueme creciendo se estima que el porcentaje se duplicara para el año 2050 (Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica, 2012; Suárez, 2016). Viendo estos datos, y analizando que el porcentaje del área urbana no tienen mas del 3% con respecto a la superficie del planeta (Fondo de Población de las Naciones Unidas, 2007; Suárez, 2016), podemos ver que a medida que pasa el tiempo la población va creciendo y de la mano también va en crecimiento las ciudades donde cambiar y transforma el planeta se convierte una forma continua.

Es por ello que la sociedad contemporánea se ha caracterizado por dos tendencias. Una de ellas se basa en la creciente urbanización a escala mundial; y la otra, se basa en la revolución digital. En este contexto surge el concepto de “ciudad inteligente” o también conocida por su traducción anglosajona como Smart city. (PwC, IE Business School y Telefónica, 2015:5)

Una ciudad inteligente se refiere a un modelo de desarrollo urbano que busca integrar soluciones tecnológicas y digitales para mejorar la calidad de vida de sus habitantes, optimizar la eficiencia en el uso de recursos y promover la sostenibilidad (Caragliu & Del Bo, 2020). Estas soluciones se utilizan en diversos ámbitos, como energía, transporte, seguridad, medio ambiente y servicios públicos y se basan en la colaboración entre ciudadanos, empresas y gobiernos para lograr un impacto positivo en la sociedad. (Rodríguez-Rodríguez et al, 2023)

TEMcompany (s. f.) señala que la geofísica es una disciplina científica que estudia las propiedades y procesos físicos de la Tierra y otros cuerpos celestes. Consiste en aplicar principios y métodos de la física para estudiar el interior de la Tierra, su superficie y sus

interacciones con diversas fuerzas y energías. La geofísica desempeña un papel fundamental en la comprensión de la estructura, la composición y el comportamiento de la Tierra y en la resolución de problemas geológicos, medioambientales y de recursos naturales.

El método magnetotelúrico (MT) es un método geofísico que permite medir las variaciones naturales de los campos electromagnéticos terrestres donde son producidas por tormentas eléctricas y el viento solar, la cual con esa información podemos estimar la resistividad eléctrica del subsuelo a diferentes profundidades, las cuales pueden variar desde cientos de metros hasta cientos de kilómetros (Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya, s. f.)

La presente investigación propone el diseño, implementación y validación de una plataforma inteligente basada en Raspberry Pi para el registro o adquisición, procesamiento y visualización de datos magnetotelúricos, orientada al monitoreo geofísico dentro del contexto de las Smart Cities. El sistema integra hardware de adquisición, procesamiento digital de señales e interfaces de monitoreo desarrolladas en HTML, permitiendo representar de manera gráfica la información obtenida mediante el método magnetotelúrico.

1. Capítulo I: El problema

1.1 Antecedente

En Ecuador se ha experimentado grandes terremotos que han causado daños importantes para la población y la infraestructura del país. Se considera vulnerable por sismos de gran magnitud. Esto se debe por su posición geográfica, se encuentra ubicado en el Cinturón de Fuego del Pacífico bajo la subducción de la placa de Nazca de tipo oceánica, y bajo la placa Sudamericana de tipo continental. En la cual estas internaciones constantes libera energía, que causa sismos en el país. (Instituto Geofísico, 2026)

El estudio revela que el comportamiento de los sismos no depende solo de la magnitud, distancia donde es provocado el sismo, va mucho más allá de lo que pensamos, las condiciones físicas del terreno, las existencias de fallas geológicas, las zonas fracturadas o materiales que no se encuentra consolidados sin su transformación completada en roca. Podemos entender que el estudio del subsuelo es importante, donde al estudiarlo podemos analizar y entender que estas fallas geológicas dan pasos a que las ondas sísmicas se amplifique y con ellos poder ver el nivel de daño que puede causar. (Ramos Quispe, 2025) Si bien existen avances en respuesta sísmica y construcción, el país sigue siendo vulnerable a los devastadores impactos de este fenómeno natural, como se evidenció en el último sismo grande registrado el 16 de abril de 2016, de magnitud Mw 7.8, y afectó principalmente a la provincia de Manabí y el sur de Esmeraldas. (Instituto Geofísico, 2026)

En la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, cuenta con el antecedente de la implementación de un equipo magnetotelúrico, introducido por un grupo de profesionales de nacionalidad colombiana que desarrollaron una fase inicial del proyecto con fines académicos y de investigación. Sin embargo, dicho proyecto no fue terminado, quedado sin un estudio que nos permita poder aprovechar el potencial del equipo magnetotelúrico para el estudio del

subsuelo de la ciudad de Manta y sus alrededores. La usencia seguía continúa dejando un vacío técnico y científico en el uso del método magnetotelúrico dentro de la universidad y en la información geofísica aplicada para la prevención sísmica. (Cano Gordillo, comunicación personal, 12 de septiembre de 2025)

1.2 Justificación

Manta se encuentra en una región con alta actividad sísmica. La información geofísica acerca de las características del subsuelo representa un apoyo para estudios relacionados con la planificación territorial, investigaciones científicas y la evaluación del comportamiento del terreno frente a eventos sísmicos. En este contexto, resulta conveniente fortalecer la línea de investigación iniciada en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, recuperando y validando el equipo magnetotelúrico previamente implementado, incluyendo mejoras en la adquisición de datos, procesamiento digital y visualización de la información.

1.3 Propuesta.

Se propone diseñar e implementar un sistema magnetotelúrico de bajo costo basado en Raspberry Pi 4 modelo B, capaz de poder recolectar, procesar y visualizar los datos en tiempo real, El sistema estará conformado por electrodos no polarizados para medir campo eléctrico natural y un magnetómetro de tres ejes para registrar el campo magnético terrestre, permitiendo registrar simultáneamente las señales electromagnéticas necesarias para el análisis magnetotelúrico, adicional este proyecto nos permitirá obtener el monitoreo remoto a través de una interfaz web desarrollada en HTML.

1.4 Problema de investigación

Actualmente, la carrera de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí no cuenta con un equipo magnetotelúrico en funcionamiento que puedan sustentar las actividades de investigación relacionadas con la exploración geofísica del subsuelo. Esta situación limita el desarrollo de prácticas experimentales a los estudiantes, así como el desarrollo de proyectos dirigidos al estudio del método magnetotelúrico y sus aplicaciones. Este trabajo tiene como objetivo potenciar la formación académica, facilitando el aprendizaje práctico del MT y con ello teniendo nuevas áreas de investigación dentro de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

1.6 Campo de acción

La presente investigación corresponde a la Carrera de Ingeniería Eléctrica de la Facultad de Ingeniería, Industria y Construcción de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí (ULEAM). Donde la implementación del equipo se realizará desde alado del campo de futbol, frente a la faculta de electricidad.

1.7 Hipótesis

Si se implementa una plataforma inteligente basada en Raspberry Pi para adquirir, procesar y visualizar datos magnetotelúricos, entonces será posible obtener información confiable sobre la resistividad aparente del subsuelo, facilitando su caracterización geofísica en la ciudad de Manta dentro del contexto de las Smart Cities.

1.8 Objetivos

1.8.1 Objetivo general

Diseñar e implementar una plataforma inteligente basada en la tarjeta Raspberry Pi 4 modelo B para la adquirir, procesar y visualizar datos magnetotelúricos en tiempo real en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

1.8.2 Objetivo específico

1. Analizar los fundamentos físicos y electromagnéticos del método magnetotelúrico para describir las propiedades geofísicas del subsuelo.
2. Crear el sistema de adquisición de datos magnetotelúrico mediante la incorporación de los siguientes elementos: electrodos no polarizados, magnetómetro, convertidor analógico – digital, receptor GPS, sensor MPU9250 y la Raspberry Pi 4 modelo B.
3. Realizar el sistema de procesamiento de las señales magnetotelúricas mediante la aplicación de la Transformada Rápida de Fourier (FFT), para obtener la impedancia, la resistividad aparente y la fase.
4. Desarrollar una interfaz web para mostrar la visualización y monitoreo en tiempo real de los datos Magnetotelúricos.
5. Interpretar y comprobar los resultados obtenidos, de la recolección de

datos del equipo magnetotelúrico, dentro de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí.

1.9 Variables

- **Variable independiente:** Implementación de una plataforma inteligente magnetotelúrica basada en Raspberry Pi.
- **Variable dependiente:** Evaluación de la característica geofísica del subsuelo mediante el análisis de la resistividad aparente.

2. Capítulo II: Marco Teórico

2.1 Geofísica

De acuerdo con Scivetti, et al. 2021 describe a la geofísica como una ciencia que se centra en el estudio de la Tierra, los Planetas y satélites como la Luna. Por otro lado, esta ciencia está estrechamente relacionada con la astronomía. No obstante, difieren debido a que la geofísica se limita solamente al estudio de la Tierra, aunque también se habla de meteorología y otras ramas.

La geofísica de la Tierra solida puede ser estudiada desde su núcleo interno hasta la superficie de la misma, de esa manera, se puede dividir en: la geofísica global, que se centra en el estudio del planeta entero y su actividad física, mientras que, la geofísica aplicada, estudia la corteza y la superficie terrestre. (Scivetti, et al. 2021)

2.1.1 Historia de la geofísica

En la remota Grecia se localizaron los primeros hallazgos acerca de la Tierra, y en siglos posteriores se evidenció información de la geofísica en algunas civilizaciones, en ese sentido, conforme pasaban los años, varios autores tenían curiosidad por descubrir los secretos que no se sabían acerca de la Tierra. Entonces, el personaje Eratóstenes de Cirene, a finales del siglo III a. C. realizó cálculos con errores mínimos del radio de la Tierra, la distancia de la Tierra con el Sol y la inclinación del eje del planeta. Por otro lado, desde que apareció el movimiento del Renacimiento, los estudios de la Tierra crecieron y el término de la geofísica se empleó inicialmente por Julius Fröbel en 1834 y por otros autores en años siguientes, pero apareció por primera vez en Alemania, gracias a Adolf Mühry en 1863, y por S. Günther en 1887. Si bien hubo algunas investigaciones geofísicas informales desde la Edad Media, se destacaron los científicos alemanes, que con mucha preparación y arduo trabajo crearon el primer equipo

llamado magnetómetro en 1879. Después de 2 décadas Emil Wiechert fue el primer catedrático quien impartió clases en 1898 en Göttingen, Alemania. (Villarroel. s.f.)

2.1.2 Desarrollo de la Geofísica

La Tierra es considerada como el primer laboratorio ya que es donde se crearon las primeras teorías científicas a partir de la observación. Hoy en día muchas de las ramas que integran a la geofísica tienen sus orígenes en las ciencias antiguas. En los siglos III y IV a.C., Eratóstenes y Aristóteles, realizaron cálculos geodésicos del tamaño de la Tierra y se discutió acerca del origen de los terremotos. La geofísica moderna se desarrolló en conjunto con la ciencia de los siglos XVI Y XVII de la mano de Galileo, Gilbert, Newton, Halley, y otros que crecieron en los posteriores siglos XVIII y XIX. No obstante, el término “Geofísica” apareció por primera vez en 1863 con el tratado de Adolf Mühry. (Villarroel. s.f.)

Asimismo, Villarroel, s.f. afirma que autores como Geophysik und Klimatographie y Georg van Neumayer, en 1871, definieron a la geofísica como el conocimiento sobre las relaciones físicas de la Tierra. Por otra parte, en 1880, el profesor de geografía Königsberg Karl J. Zöppritz definieron más concretamente a la Geofísica como una parte de la ciencia que hace énfasis al estudio de la actividad de las fuerzas físicas responsables del origen, la evolución y la estructura de la Tierra, para este autor, la geofísica llena un vacío que faltaba en la ciencia de la Tierra y que constituyeron la geografía y geología. De acuerdo a lo expuesto, antes que se generalizara el término geofísica, los contenidos de esta ciencia se señalaron con otros nombres. A. G. Werner, que se originó en la minería y geología, por el cual se utilizó el término “Geognosia” en 1755 y mucho antes, en el siglo XVII, J. Zahn y A. Kircher se utilizó Geoscópica. Alejandro von Humbolt, fue considerado como uno de los padres de la geofísica moderna, utilizó el término Physikalische Geographie (Geografía Física) y Franz Neumann el de Physik der Erde (Física de la Tierra). A finales del siglo XVIII y principios del XIX, fuera del ámbito germano, en Francia, se encontró el uso del término Theorie de la Terre (Teoría de

la Tierra) por De la Metherie y el de Physique du Globe (Física del Globo) por Saigey, que aún se sigue usando hasta en estos tiempos. En Inglaterra, el profesor de Cambridge W. Hopkins introdujo en 1838 el término Physical Geology (Geología Física) para nombrar a esta ciencia que trata acerca de los aspectos fisicomatemáticos de la Geología como menciona Kertz, a finales del siglo XIX, la Física había perdido el interés por la Tierra, para la Geología los métodos de la Geofísica le eran extraños y sus temas demasiado generales y algo parecido le sucedía a la Geografía. Esta situación justificaba el nacimiento de una ciencia dividida con un nombre y contenido en específico, la Geofísica. Esta ciencia queda plasmada definitivamente a finales del siglo XIX con el texto de S. Günther Handbuch der Geophysik, publicado en 1887. (Villarroel. s.f., y Udías y Mezcúa, 1997, p. 19-22)

2.1.3 Métodos estudios del subsuelo

Dentro de la geofísica, cuando nos dirigimos a estudiar un punto específico como es el estudio del subsuelo, tenemos diferentes técnicas, que nos ayudaran a obtener información de la misma, en la cuales tenemos métodos sísmicos, métodos eléctricos, métodos electromagnéticos, métodos de potenciales y métodos georradar. (GAMA Geofísica, s. f.)

2.1.3.1. Método sísmico

GAMA Geofísica (s. f.) explican que los métodos sísmicos buscan entender como viajan las vibraciones dentro del subsuelo, las cuales estas vibraciones se van propagan y son registrada con los sensores llamados geófonos las cual se tienen que distribuir para una correcta medición, las ondas son generadas de dos diferentes formas, la primera de manera artificial como la de golpear el suelo con un martillo o dejando caer un peso, la segunda manera es de forma natural la llamada sísmica pasiva.

De acuerdo con Gama Geofísica dentro de los principales métodos sísmico tenemos:

- **Sísmica de refracción:** Es un método en el cual el estudio principal es obtener la velocidad sísmica y el espesor de cada capa, eso se debe al análisis del tiempo que llega la onda refractada, donde se busca entender ese comportamiento de las ondas cuando cambian de dirección y se sigue propagándose, el método se lo utiliza mucho en el campo de la ingeniería civil y geotecnia
- **Sísmica de reflexión:** El método se basa en el análisis de las ondas reflejadas, donde el comportamiento de la onda, es que rebota y regresa hacia la superficie, su información principal es obtener imagen detalladas de las capas de subsuelo sin perforación, su estudio tiene un alcance mayor en profundidad que el análisis del método de refracción.
- **Tomografía sísmica de superficie:** Este método tiene un avance mas profundo en el método sísmico de refracción, permite obtener modelos de 2D y modelos de 3D que ofrece una representación mas clara de lo que es el subsuelo.
- **Método sísmico pasivo REMI:** Es una técnica que se lo utiliza en la actualidad, en la geotecnia y en el estudio de subsuelo, unas de las diferencias con las demás técnicas es que no usa fuentes artificiales, utiliza vibraciones o fuerte ruido sísmico para su estudio en la cual buscar obtener la velocidad de la onda S y onda P.

2.1.3.2. Método eléctrico

Los métodos eléctricos se lo pueden definir como un conjunto de técnicas que se basa principalmente en la inyección de corriente para medir la diferencia potencial con los electrodos, el objetivo es de obtener la resistividad eléctrica. Dentro de la rama de la geofísica tenemos la geoelectrica que utiliza los métodos eléctricos para el análisis del subsuelo. La geoelectrica tiene un avance importante como el desarrollo de las configuraciones o arreglos en la cuales tenemos, Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, polo-dipolo, etc. (GAMA Geofísica, s. f.)

Adicional GAMA Geofísica (s. f.) nos menciona que dentro de la geoelectrica se tiene dos técnicas importantes la cual ayuda a la obra civil, geotecnia, hidrogeología y medio ambiente, esas dos técnicas tenemos las tomografías eléctricas y los sondeos eléctricos verticales SEVs.

2.1.3.3. Método georradar

El método georradar GPR (“Ground Penetrating Radar”) estudia las señales electromagnéticas la cual son generadas por una antena emisora y otra antena permite receptar la señal reflejada, esa señal reflejada es estudiada para obtener información como objetos, estructuras arqueológicas y ver si hay cambio en las propiedades del subsuelo. El método tiene un rango de frecuencias que va desde los 20 MHz hasta 1 GHz, este rango permite tener un buen alcance con una alta resolución en el estudio, donde la señal son recolectadas en tiempo real por el radagrama, aunque su estudio de profundidad de penetración es de pocos metros esto se debe a la alta frecuencia que utilizan por eso es que el rango de frecuencia es amplio. (GAMA Geofísica, s. f.)

2.1.3.4. Métodos potenciales

El método potencial es una técnica pasiva no invasiva, donde la utilización de este método se da con dos fuentes naturales que viene siendo los campos gravitatorios y campos magnéticos terrestre, su principal aporte a la ciencia es detectar anomalías dentro de subsuelo donde su profundidad de investigación tiene un rango de decenas hasta varios kilómetros, (GAMA Geofísica, s. f.)

GAMA Geofísica (s. f.) afirma que los principales métodos potenciales son los estudios de prospección gravimetría y la magnética, que se describe a continuación:

- Gravimetría: Se enfoca en el estudio del campo gravitatorio su función principal es detectar cambios en la densidad de los materiales que tiene el subsuelo, este estudio se usa primordialmente en la parte de la minería metálica y en la geotecnia. (GAMA Geofísica., s. f.)

- **Magnetometría:** Es un método geofísico pasivo que busca estudiar las variaciones de los campos magnéticos terrestre, que son producidas por materiales que tienen susceptibilidad magnética, este método es más eficiente y económico donde se lo utiliza especialmente en arqueología, minería y también en geología (GAMA Geofísica, s. f.)

2.1.3.5. Métodos electromagnéticos

Los métodos electromagnéticos, es un método geofísico pasivo que buscar estudiar el subsuelo mediante la recolección de datos de los campos magnéticos y campos eléctricos variables, los datos que son recolectados y procesados pueden ser de forma natural o artificial, el estudio es muy recomendado que se puede analizar con profundidad. La interpretación de los datos se puede dar de 1D, 2D, 3D donde su importancia radica en la forma de poder interpretar el subsuelo. (GAMA Geofísica, s. f.)

Dentro de los métodos electromagnéticos se destaca los siguientes estudios:

- **Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT):** Es un método que se utiliza para obtener la resistividad eléctrica del subsuelo la cual lo realiza en el dominio del tiempo, para este análisis de los campos se hace mediante una inyección de corriente de forma artificial.
- **Magnetotelúrico:** Este estudio proporciona el análisis de la resistividad eléctrica en la zona estudiada, la cual su profundidad de estudio puede ir de los cientos de metros hasta los kilómetros, con el objetivo de estudiar la composición de los materiales.

De los métodos geofísicos presentados, el presente estudio se enfoca en el método electromagnético, ya que dentro de esta clasificación se encuentra el método magnetotelúrico (MT), técnica sobre la cual se fundamenta el desarrollo de esta investigación. Por tal motivo, en los siguientes apartados se describen sus antecedentes, principios físicos y funcionamiento.

2.2 Método Magnetotelúrico

El método magnetotelúrico o magnetotelúrica es una técnica de investigación geofísica que se basa en el electromagnetismo, y se puede medir las propiedades eléctricas de la Tierra en profundidad. Las señales fuentes para el método magnetotelúrico son naturales de origen externo. Cuando esta fuente externa, conocida como campo electromagnético primario, alcanza la superficie de la tierra, parte de ella se refleja y la parte que resta penetra en la Tierra, de manera que se generan corrientes eléctricas inducidas (conocidas como corrientes telúricas) que generan un campo magnético secundario. (Pávez Moreno, 2015, cap. 3, p.10)

2.2.1 Historia del método magnetotelúrico

Gupta y Roy, 2007 señalan que en la diversidad de estudios que han investigado la posibilidad de determinar la estructura eléctrica de la Tierra por medio del análisis de estos fenómenos, desde la segunda mitad del siglo XIX. No obstante, la idea básica de utilizarla como técnica de investigación fue desarrollada independientemente en diferentes países por Tikhonov (1950), Rikitake (1950) y Cagniard (1953), quienes, eligieron el nombre de "magnetotelúrica", comúnmente conocida como magnetotelúrica (MT). Estos primeros autores sentaron las bases del método MT , cuyo enorme potencial fue reconocido de inmediato por investigadores e industrias de exploración. Sin embargo, su fiabilidad y su uso actual son fruto de la colaboración de varios investigadores de gran prestigio que compartieron sus

conocimientos publicando sus hallazgos, brindando apoyo activo y promoviendo la interacción entre toda la comunidad científica de MT. En consecuencia, el Taller Bienal de Inducción Electromagnética (EMIW), iniciado en 1972, sigue activo. Estas instalaciones han crecido desde la última década del siglo XX gracias al sitio web MTNet, cuyo principal impulsor fue Alan G. Jones.

MTNet es un portal de internet donde profesionales de la traducción automática, distribuidos por todo el mundo, pueden intercambiar conocimientos, códigos y datos, manteniéndose siempre conectados e informados. Por último, las mejoras tecnológicas de los equipos comerciales de traducción automática han desempeñado un punto importante ya que busca que cada equipo tenga una confiabilidad en los datos. (Gupta y Roy, 2007)

2.3 Principios físicos del método

Las señales de MT tienen provenien de dos bandas de frecuencias características que surgen por diferentes motivos. El origen corresponde a bajas frecuencias (periodos largos) en las señales de las ondas electromagnéticas, generalmente inferiores a 1 Hz. Estas señales surgen por el impacto que son provocados por los vientos solares y la magnetosfera. Estas señales se generan cuando el viento solar emite corrientes de iones, que viajan a través del espacio, perturbando el ambiente del campo magnético de la Tierra, y producen energía electromagnética de baja frecuencia que interactúa con la Tierra. (Pavez Moreno, 2015, cap. 3, p. 11)

Otro origen corresponde a altas frecuencias (periodos cortos) superiores que 1 Hz, producidas por descargas eléctricas en la atmósfera, generalmente cerca del Ecuador. Las señales producidas por estas tormentas viajan alrededor de la Tierra, donde parte de la energía penetra en el interior de la Tierra. El método consiste en medir los campos eléctricos (E) y

magnéticos (B) naturales en la superficie de la Tierra de forma simultánea en un sólo punto (Dmitriev & Berdichevsky, 1979). El método se basa en la propagación vertical de una onda plana electromagnética para un modelo de capas planas de la Tierra. A medida que la onda viaja en profundidad, su amplitud se va atenuando dependiendo de la conductividad eléctrica (estructuras) presente en cada una de las capas.

2.3.1. Inducción electromagnética

La inducción electromagnética, fue descubierta por Michael Faraday en el año de 1831, revela la fascinante relación entre los campos magnéticos y las corrientes eléctricas, transformando radicalmente nuestra comprensión de la generación de energía. El principio de la inducción electromagnética establece que cuando tenemos un campo magnético cambiante puede inducir una corriente eléctrica en un conductor, eliminando la necesidad de una batería para producirla. (SimScale, 2026).

Para comprender la inducción electromagnética, es importante conocer primero las propiedades básicas de los campos magnéticos. Estos se diferencian de los campos eléctricos, por lo que su interpretación y análisis suelen resultar más complejos.

SimScale, 2026 enfatiza que, en el campo del electromagnetismo, el término “campo magnético” hace referencia a dos campos vectoriales que están estrechamente relacionados y representados por los símbolos B y H. B es la densidad de flujo magnético y se mide en Tesla. [T], mientras que [H] es la intensidad del campo magnético y su unidad es [A/m]. A diferencia de los campos eléctricos, que surgen directamente a partir de cargas individuales, los campos magnéticos surgen sutilmente en ausencia de cargas magnéticas. Además, la ausencia de cargas magnéticas da como resultado a las líneas de campo magnético (más precisamente, a la densidad de flujo magnético B) que siempre forman bucles cerrados que no tienen principio ni

final. En este caso, el campo magnético se refiere a la densidad de flujo magnético.

En ausencia de cargas magnéticas, la generación de campos magnéticos se produce de forma indirecta. Es un principio natural que el movimiento de cargas eléctricas, incluidos los electrones, creando campos magnéticos. Se refiere a las corrientes eléctricas que fluyen a través de los cables porque implican el movimiento colectivo de numerosos electrones. Por lo tanto, una corriente continua (CC) que fluye a través del cable genera un campo magnético que forma un patrón circular alrededor del mismo, como se muestra en la Figura 1. (SimScale, 2026)

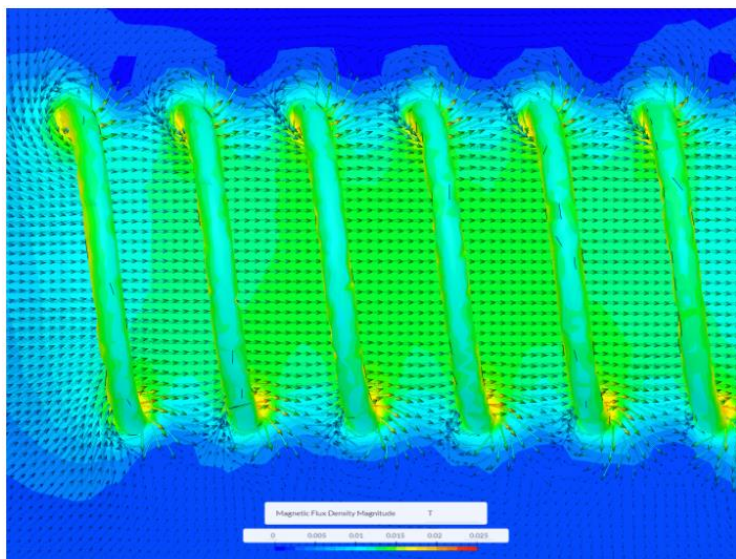


Figura 1. Líneas de campo magnético alrededor de una bobina de alambre. Los vectores muestran las líneas de campo magnético que forman un bucle alrededor de cada alambre individual. Sacado de (SimScale, 2026)

2.3.2 Campos electromagnéticos naturales

2.3.2.1. Campo geomagnético

El Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa (s. f.) explica que una simplificación o primera aproximación del campo magnético terrestre puede describirse como correspondiente a una pequeña barra de imán, supuestamente ubicada cerca del centro de la Tierra (figura 2). El Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa (s. f.) explica que una simplificación o primera aproximación del campo magnético terrestre puede describirse como correspondiente a una pequeña barra de imán, supuestamente ubicada cerca del centro de la Tierra (figura 2). A lo largo de la barra del eje del imán se distingue como eje magnético y al extenderse en la superficie terrestre, se ejecutará en dos puntos conocidos como polos magnéticos. Se encuentra el polo magnético norte y el polo magnético sur de acuerdo a sus hemisferios. El eje magnético está predeterminado 11° con relación al eje geográfico de la Tierra, de manera que el polo magnético norte se encuentra en el Ártico a más o menos una latitud de 75.6° N y 101° W de longitud, mientras que el polo magnético sur está de la Antártida a 66.3° S de latitud y 141° E de longitud. La ubicación de estos polos tiene pequeños corrimientos diarios y estacionales, que puede ser en principio por las variaciones transitorias del campo magnético terrestre.

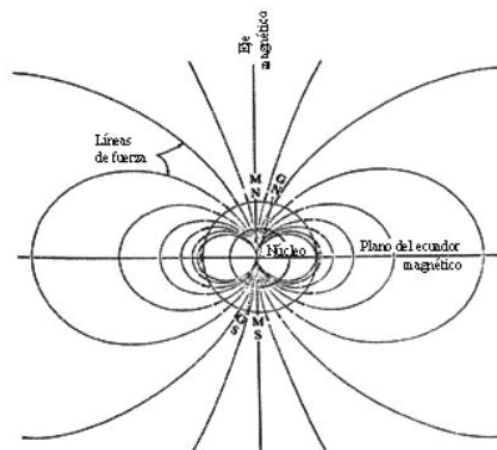


Figura 2. Representación esquemática de las líneas de fuerza del campo magnético de la tierra.

Tomado de ILCE (S.F.)

2.3.2.2. Origen del campo geomagnético

Se estima que alrededor del 95 % del campo magnético terrestre se crea en el interior de nuestro planeta, por lo que su origen se basa en los procesos que tienen lugar en el núcleo terrestre. Consiste en una aleación de hierro (Fe) y níquel (Ni), cuya capa exterior se encuentra en estado líquido. El núcleo tiene un diámetro aproximadamente de 6 920 km, ligeramente mayor al radio de la Tierra, y está rodeado por el manto, una capa de roca sólida con un espesor cercano a los 2 860 km. La interacción entre las propiedades y los movimientos del núcleo externo constituye el mecanismo responsable de la generación y mantenimiento del campo magnético terrestre, así como de sus variaciones a lo largo del tiempo. (Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, s. f.).

La teoría de dínamo demuestra cómo funciona el magnetismo interno de la Tierra, la cual menciona que el núcleo líquido gira de forma lenta, en relación con el manto sólido, y de esa manera genera corrientes eléctricas que rodean al núcleo. Estas corrientes a su

vez generan un campo magnético (Figura 3), una parte se fuga a la superficie de la Tierra, ofreciéndonos el campo magnético que observamos, y otra parte interacciona con el núcleo líquido que está en movimiento, manteniendo el efecto de la acción del dínamo. (Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, s. f.)

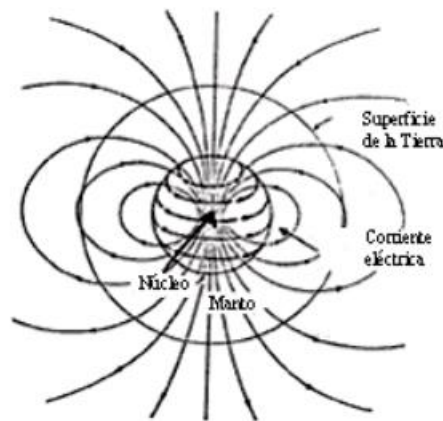


Figura 3. Formación del campo magnético terrestre a partir de las corrientes eléctricas del núcleo. Tomado de Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, s. f.

2.3.2.3. Viento Solar

González (2025) explica que hay un “viento” que emana del Sol y que azota todo lo que existe en el sistema solar y más allá, incluida la Tierra. A pesar de estar envuelto en un escudo protector denominado magnetosfera, nuestro planeta no es inmune a las partículas cargadas eléctricamente que conforman el viento solar, y que pueden afectar las comunicaciones y las redes eléctricas en tierra.

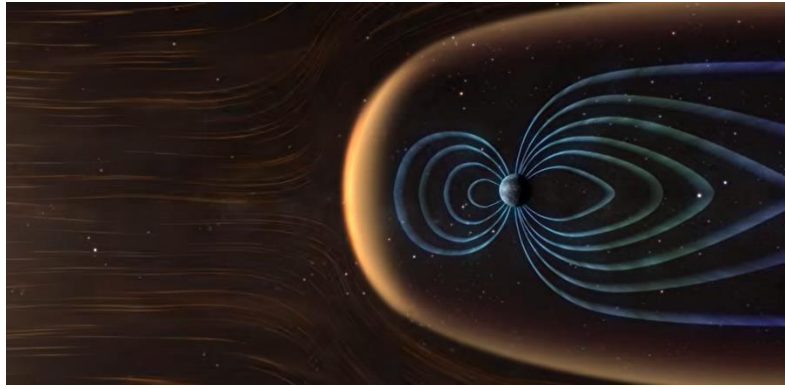


Figura 4. Representación esquemática del viento solar interactuando con el campo magnético terrestre. Tomado de Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa, s. f.)

Akasofu (2003) explica que el viento solar se compone en principio de electrones y protones liberados de los átomos de hidrógeno del Sol, no obstante, contiene iones más pesados y campos magnéticos. Esta tormenta solar prolonga los planetas y los envuelve, trasladando la atmósfera solar hacia el espacio interestelar a un ritmo de un millón de toneladas (10^6 toneladas = 10^9 kg) por segundo.

Las observaciones realizadas por naves espaciales han identificado dos componentes principales del viento solar: uno rápido y uniforme que sopla a unos 750 km/s y otro lento, variable y racheado que se mueve aproximadamente la mitad de esa velocidad. De manera que llega a la órbita de la Tierra, el viento solar se reduce debido a su expansión en el creciente volumen del espacio hasta aproximadamente cinco millones de electrones y cinco millones de protones por metro cúbico. (Akasofu, 2003)

2.3.2.4. La magnetosfera

La magnetosfera corresponde a la región del espacio que rodea la Tierra donde predomina el campo magnético terrestre, ante el campo magnético del espacio interplanetario. Como se observa en la Figura 5, el cambio de la magnetosfera se da por la interacción del viento solar dirigido con el campo magnético terrestre. (National Oceanic and Atmospheric Administration, s. f.)

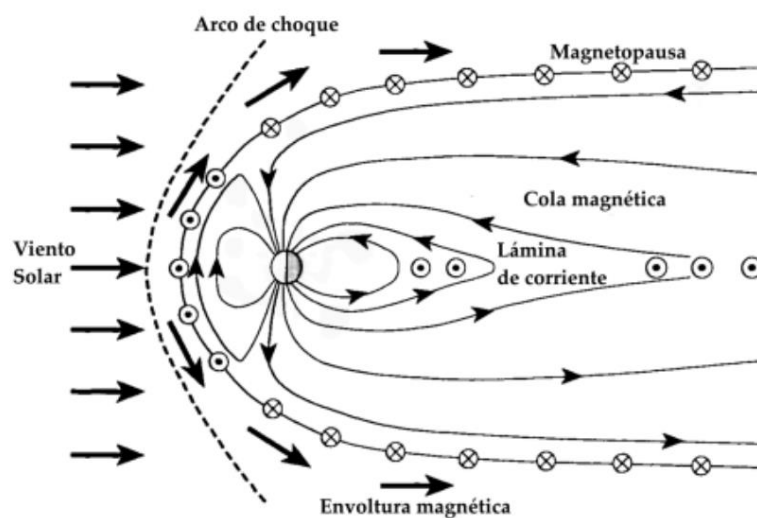


Figura 5. Forma y tamaño del campo magnético terrestre, que cambia continuamente al ser impactado por el viento solar. (NOAA, s. f.)

El conocimiento del campo magnético se remonta a miles de años desde que los chinos descubrieron que algunos minerales magnéticos, como las magnetitas, se alineaban en dirección norte-sur. No obstante, la explicación de este suceso no se comprendió hasta 1600, cuando William Gilbert publicó *De Magnete* y demostró que nuestra Tierra se comporta como un imán gigante y que las magnetitas se alineaban con el campo magnético terrestre. (National Oceanic and Atmospheric Administration, s. f.)

Las investigaciones desarrolladas a lo largo de los siglos siguientes demostraron que, aunque el campo magnético terrestre se acerca en gran medida, como un dipolo, con polos norte y sur, como un imán de barra simple. El eje magnético terrestre, el dipolo, está inclinado unos 11 grados con respecto al eje de rotación de la Tierra. Si el espacio fuera un vacío, el campo magnético terrestre se extendería hasta el infinito, debilitándose con la distancia. No obstante, en 1951, mientras estudiaba por qué las colas de los cometas siempre apuntan en dirección opuesta al Sol, Ludwig Biermann descubrió que el Sol emite un flujo continuo de plasma, denominándose viento solar y está constituido por electrones y protones, con un campo magnético incorporado, se relaciona con la Tierra y otros objetos del sistema solar. La presión del viento solar sobre el campo magnético terrestre lo comprime en el lado diurno de la Tierra y lo estira formando una larga cola en el lado nocturno. La forma del campo distorsionado resultante se ha comparado con la apariencia del agua fluyendo alrededor de una roca en un arroyo. En el lado diurno de la Tierra, alcanza aproximadamente 10 radios terrestres desde el centro de la Tierra, mientras que en el lado nocturno puede expandirse a cientos de radios terrestres, incluso sobrepasando más allá de la órbita de la Luna, encontrándose a 60 radios terrestres. (National Oceanic and Atmospheric Administration, s. f.)

2.3.2.5. La ionosfera

UCAR Center for Science Education (s. f.) explica que la ionosfera es una región de la atmósfera terrestre, contiene una serie de regiones con una cantidad relativamente grande de átomos y moléculas con carga eléctrica. En este sentido, los rayos X de alta energía y la luz ultravioleta (UV) provenientes del Sol se colisionan constantemente con las moléculas de gas y los átomos en la atmósfera superior de la Tierra. Algunas de estas colisiones desprenden electrones de los átomos y las moléculas, generando iones con carga eléctrica (átomos o moléculas con electrones faltantes) y electrones libres. Estos iones y electrones con carga

eléctrica se mueven y se comportan de manera diferente a los átomos y moléculas normales, eléctricamente neutros. Las regiones con mayor concentración de iones y electrones libres se encuentran a diferentes altitudes y se conocen, en conjunto, como la ionosfera.

La ionosfera se divide en tres regiones principales: las capas D, E y F. Estas regiones no tienen límites definidos y su altitud varía a lo largo del día y según la estación del año. La región D es la más baja, se encuentra aproximadamente entre 60 o 70 km sobre el suelo. La región más alta es la E, entre los 90 o 100 km y la parte más elevada de la ionosfera, la región F, se extiende a unos 150 km mucho más arriba, a veces hasta 500 km sobre la superficie de nuestro planeta. (UCAR Center for Science Education, s. f.)

Las regiones de la ionosfera no se consideran capas separadas, como la troposfera y la estratosfera, más conocidas. En cambio, son regiones ionizadas integradas en las capas atmosféricas estándar. La región D se forma generalmente en la parte superior de la mesosfera, mientras que la región E suele aparecer en la termosfera inferior y la región F se encuentra en las capas superiores de la termosfera. (UCAR Center for Science Education, s. f.)

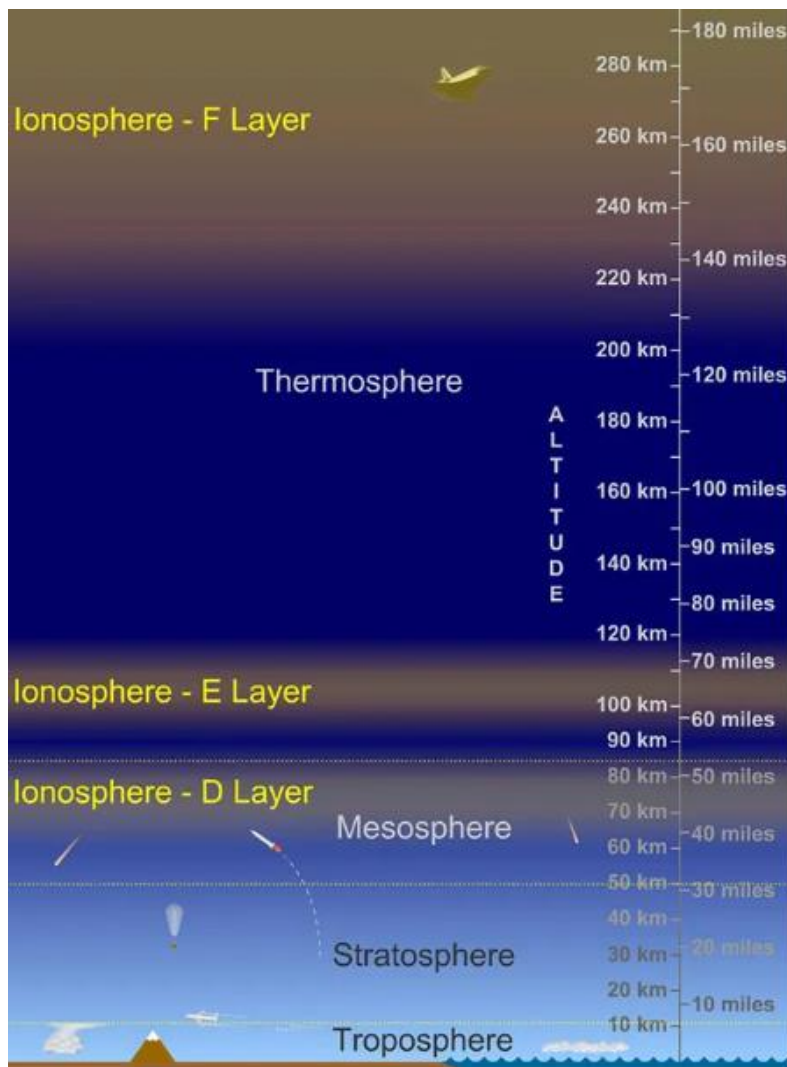


Figura 6. Regiones de la ionosfera, que muestran las capas D, E y F. UCAR/Randy Russell.
(UCAR, s.f)

2.3.2.6. Descargas atmosféricas

Suramericana (2020) señala como un fenómeno natural impresionante a las descargas atmosféricas y cuando no se tenía estudios acerca de esto, nuestros antepasados relacionaron su origen como una expresión de poder de un Dios o un ser divino, no obstante, la ciencia avanzó tanto que se pudo conocer el origen de estas descargas, son procesos físicos naturales que incluso con estudios previos permiten mitigar el impacto.

2.3.2.7. ¿Cuál es el origen de las descargas eléctricas?

Las descargas eléctricas se originan en erupciones volcánicas, incendios forestales, tormentas de nieve, tormentas de polvo y otros que en su mayoría crean nubes de tipo cumulonimbus, estas, son nubes de tormenta que se caracterizan principalmente por causar fenómenos atmosféricos, catalogándose como un peligro para los organismos que habitan en la Tierra. Los fenómenos naturales como huracanes, tornados, lluvias torrenciales, granizadas y descargas eléctricas se originan en las nubes de tormenta, estas nubes en su interior presentan corrientes de viento que suben y bajan, y poseen gran variabilidad de temperaturas. Estas corrientes tienen la capacidad de desplazar a gran velocidad las partículas de hielo, nieve y gotas de agua contenidas dentro de la estructura de la nube, denominados como hidrometeoros. (Suramericana, 2020)

El proceso de cómo se forma una descarga eléctrica atmosférica inicia con el movimiento continuo de los hidrometeoros, como gotas de agua, cristales de hielo y partículas de nieve, dentro de las nubes cumulonimbus. Mientras las partículas más grandes se cargan en negativo y, se quedan en la base de la nube que se debe a la fuerza de gravedad, mientras que las partículas más pequeñas se cargan positivamente y permanecen en las capas más altas de la nube. Esta distribución genera una estructura de cargas opuestas en el interior de la nube, condición fundamental para el desarrollo de las descargas atmosféricas. Asimismo, la acumulación de cargas negativas en la base de la nube induce una redistribución de las cargas presentes en la superficie terrestre, haciendo que el suelo y los objetos cercanos adquieran una carga positiva. Por lo tanto, el potencial eléctrico entre la nube y la Tierra aumenta progresivamente hasta superar la capacidad aislante del aire. En ese momento, el aire experimenta un proceso de ionización, por el cual se forman canales conductores que permiten el flujo de la corriente eléctrica y dan lugar a la descarga atmosférica o rayo. (Suramericana, 2020)

Con lo mencionado, las fluctuaciones naturales del campo electromagnético de la Tierra, el método magnetotelúrico utiliza esta energía natural que está presente continuamente donde son receptadas por los electrodos no polarizados y bobinas para la recolección de datos donde serán procesadas y analizadas.

2.3.4 Ondas electromagnéticas

Una onda electromagnética se genera por la interacción simultánea de un campo eléctrico y otro magnético que son perpendiculares entre si y varían en el tiempo. Las ondas electromagnéticas se desplazan a la velocidad de la luz (3.108 m/s), en dirección perpendicular al plano formado por los dos campos. En ese sentido, un campo se define como una región del espacio en la que se manifiesta la influencia de determinadas fuerzas: eléctrica, en el campo eléctrico, y magnética, en el magnético. (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, s. f.)

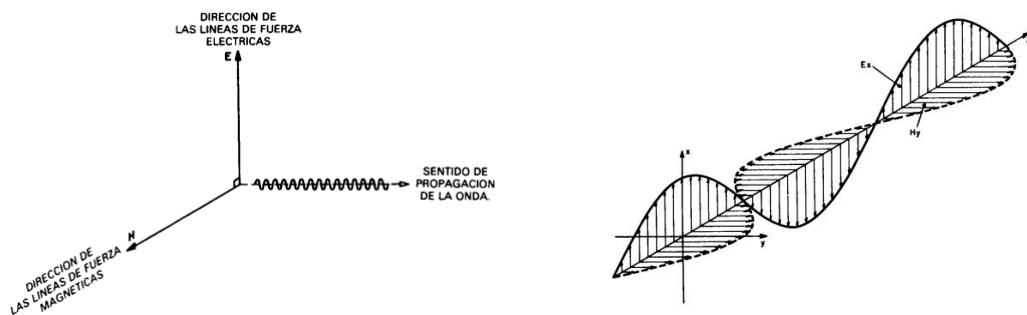


Figura 7. Representación esquemática de las ondas electromagnéticas utilizadas en el método magnetotelúrico: (a) orientación perpendicular entre los campos eléctrico y magnético; (b) comportamiento sinusoidal de las componentes electromagnéticas durante su propagación. Tomado de Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, s. f.

Si consideramos que la variación de estos campos es senoidal, en el sistema de ejes cartesianos (x,y,z), el campo eléctrico E_x varía de forma senoidal en el plano x,z , el campo

magnético H_y varía de igual forma en el plano y,z , y la onda se transporta en la dirección del eje z . Los campos eléctrico y magnético se anulan en ciertos momentos y son máximos en otros; cuando una onda se propaga por el espacio, los campos eléctrico y magnético se transportan en el sentido del eje z , formando un plano que se denomina frente de ondas. (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, s. f.)

Una onda electromagnética se propaga en línea recta en el seno de un medio homogéneo; su velocidad de propagación en el vacío es de 3.108 m/s , es por ello que en un medio cualquiera diferente que tenga un índice de refracción n se propagará a la velocidad de: $v \text{ (m/s)} = \frac{c}{n}$. En la atmósfera terrestre n es muy cercano a la unidad y podemos confirmar que la velocidad de propagación de una onda es constante e igual a c . La propagación de una onda electromagnética puede estar sujeta a efectos de reflexión, refracción y difracción, que en estos casos cumplen con las leyes generales de la óptica. Existe reflexión cuando una onda influye sobre una superficie metálica, el suelo o cualquier tipo de obstáculo. En este caso, se cumple que el ángulo de incidencia de la onda con la normal a la superficie reflectora, es igual al ángulo de reflexión de la onda con la normal. (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, s. f.)

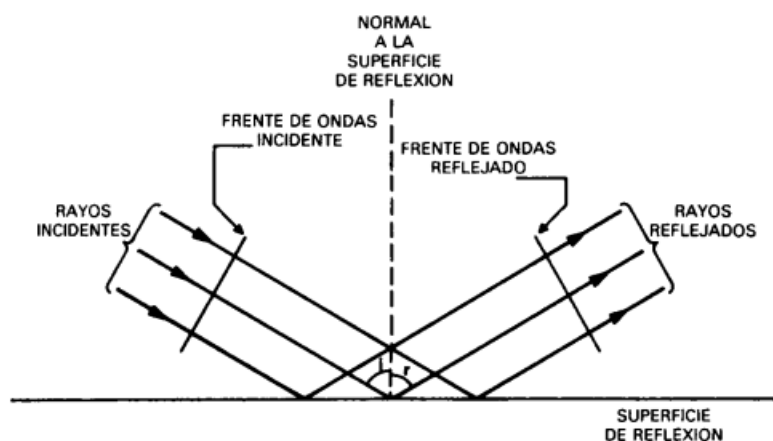


Figura 8. Comportamiento de una onda incidente y una onda reflejada. Tomado de Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, s. f.

La refracción de una onda electromagnética se produce cuando pasa de un medio a otro con un índice de refracción igual al primero. De esa forma, la onda electromagnética se refractará cuando ésta pase del aire al agua o atraviese diferentes capas atmosféricas que tengan distinto grado de humedad. Cuando se produce la refracción de una onda electromagnética, tendremos una reflexión de energía sobre la superficie de separación, por lo cual, la energía de la onda refractada será menor que la del incidente. (Universidad de Las Palmas de Gran Canaria, s. f.)

2.3.4.1 Campo primario y secundario

El viento solar, constituido por partículas cargadas emitidas desde la corona solar, interactúa con la magnetósfera terrestre, deformando el campo magnético del planeta y generando corrientes eléctricas en la magnetósfera y la ionósfera. Esas corrientes al ser variables causan Cambios temporales del campo magnéticos terrestre, en la cual es conocido como campo primario. A medida que se va introduciendo en el suelo o al interior, este mismo campo puede inducir por la ley de Faraday un campo eléctrico. Ese efecto provoca lo que llamamos corrientes telúricas, cuya energía y distribución esta ligadamente controlada por la resistividad eléctrica de los materiales. A su vez, estas corrientes generan un campo magnético secundario, el cual es medido junto con el campo eléctrico superficial por el sistema magnetotelúrico para caracterizar la estructura eléctrica del subsuelo. (McPherron, 2026; NASA, s. f.; Simpson & Bahr, 2005)

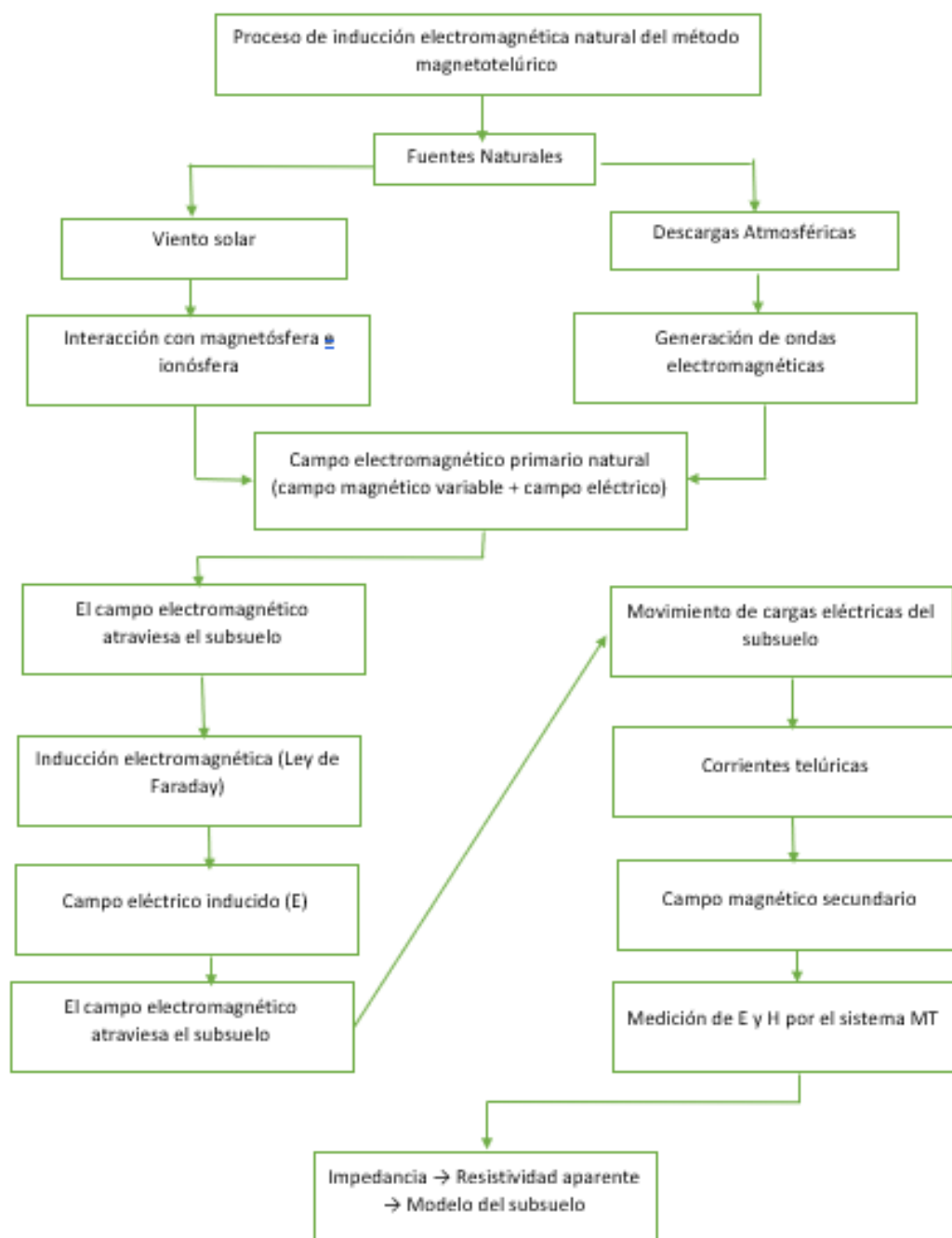


Figura 9. Diagrama del proceso de inducción electromagnética natural del método magnetotelúrico. Fuente: autoría propia.

2.3.4.2. Corriente telúrica

Las corrientes telúricas corresponden a corrientes eléctricas naturales que circulan tanto en la superficie como en el interior de la Tierra, generalmente con una dirección próxima paralela a la superficie terrestre. Estas corrientes son provocadas por el flujo de cargas eléctricas donde obtenemos una diferencia de tensión generada por procesos naturales. Las principales fuentes tenemos en la magnetosfera y por los vientos solares en la ionosfera. Al introducirse al suelo, estas corrientes telúricas presentan variaciones la cual están asociadas a los materiales geológicos de la misma, esto se debe por la resistividad que tienen. Debido a esta relación, las corrientes telúricas constituyen una herramienta fundamental en estudios geofísicos, ya que permiten identificar cambios en la estructura interna de la Tierra, como cuencas sedimentarias, unidades estratificadas y zonas de falla. Una densidad o gradiente de corriente anómalo puede indicar una característica estructural subterránea. (McPherron, 2026)

2.3.4.3. Skin Depth

Cuando las ondas electromagnéticas entran en contacto con la superficie de la Tierra, penetran en ella, generando una atenuación en la onda hasta extinguirse a cierta profundidad, debido a que la Tierra se comporta como un medio que es considerado levemente conductor. Esta profundidad se conoce como profundidad de penetración (skin Depth), dependiendo tanto de la resistividad del medio (inverso de la conductividad) como de la frecuencia de las ondas. (Pávez Moreno, 2015, cap. 3, p. 10)

Conociendo la profundidad de penetración, es posible determinar una profundidad donde la calidad de las mediciones es confiable. Dependiendo de esta profundidad, la Magnetotelúrica se puede aplicar en el estudio de estructuras que se encuentren a profundidades que van desde los cientos de metros a los centenares de kilómetros. Así, análisis estructurales

en profundidad o investigación de reservorios geotermiales en su etapa de exploración, son algunas de las aplicaciones de este método. (Pávez Moreno, 2015, cap. 3, p. 11)

La U.S. Environmental Protection Agency (2026) establece que la profundidad de penetración es la profundidad a la que la señal electromagnética se atenúa a $1/e$, o aproximadamente a un tercio. La profundidad de penetración generalmente se puede medir en metros y está relacionada con la frecuencia (f) de la onda electromagnética y la conductividad eléctrica (σ) del medio (es decir, los materiales geológicos) a través del cual se propaga la onda electromagnética.

$$\text{Profundidad de penetración} = 500 \sqrt{1 / (\sigma f)}$$

La profundidad de penetración es inversamente proporcional a la conductividad (σ) y la frecuencia (f). Los materiales terrestres con mayor conductividad eléctrica y las ondas electromagnéticas de mayor frecuencia dan como resultado una menor penetración de estas ondas. La frecuencia de la onda implica una relación inversa entre resolución y profundidad. A mayor frecuencia, mayor resolución y menor penetración (menor profundidad de penetración), mientras que, a menor frecuencia, mayor penetración de la señal (mayor profundidad de penetración) y menor resolución. (U.S. Environmental Protection Agency, 2026)

2.3.4.4. Impedancia

Pávez Moreno, 2015, sugiere que, al medir los campos electromagnéticos, se puede obtener la razón compleja entre ellas, conocida como impedancia (Z), definida por las siguientes relaciones (para el caso unidimensional), que son deducidas de las ecuaciones de Maxwell, y la ecuación de ondas:

$$E_x = Z_1 H_y \quad (2.1)$$

$$E_y = Z_2 H_x \quad (2.2)$$

$$B = \mu_0 H \quad (2.3)$$

2.3.4.5. Ecuaciones de Maxwell

Las ecuaciones de Maxwell son fundamentales para poder comprender los campos electromagnéticos, ya que son la base de toda la teoría que sustenta este método. Al usar las ecuaciones nos permite visualizar matemáticamente como esos campos electromagnéticos naturales pueden interactuar con la tierra. Al conocer esa interacción podemos estudiar la estructura de la misma. (Pávez Moreno, 2015)

Las ecuaciones de Maxwell se pueden describir de la siguiente forma:

$$\nabla \times H = J_c + \frac{dD}{dt} \quad \text{Ley de ampere} \quad (2.4)$$

$$\nabla \times E = - \frac{dB}{dt} \quad \text{Ley Faraday} \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot D = p \quad \text{Ley de Gauss para campos eléctricos} \quad (2.6)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad \text{Ley de Gauss para campo magnéticos} \quad (2.7)$$

- “H” Intensidad de Campo magnético [A/m]
- “E” Intensidad de Campo eléctrico [V/m]
- “B” Vector de Inducción magnética [Wb/m²]
- “D” Vector de desplazamiento eléctrico [C/m²]
- “J” Densidad de Corriente [A/m²]

Con base en las definiciones dadas por Orellana (1974), se pueden describir de la siguiente manera:

2.3.4.6. Ley de Ampere

Define la relación entre los campos eléctricos y magnéticos, con corrientes eléctricas, también define una relación simétrica entre inducción, porque un campo eléctrico variable, puede crear un campo magnético y, por lo tanto, una corriente eléctrica en un circuito. Cuando la ecuación se ve en el segundo elemento de la ecuación, la ley de ampere nos dice que el primer factor representa el flujo o movimiento de electrones, por lo siguiente el segundo factor representa a la corriente de desplazamiento, que viene dado cuando el campo eléctrico varía en el tiempo. (Pávez Moreno, 2015)

2.3.4.7. Ley de Faraday (Inducción Electromagnética)

Pávez Moreno, 2015 explica que esta ley de Faraday al obtener un campo magnético que sea variable con el tiempo, puede obtener un campo eléctrico, la cual ese campo eléctrico puede provocar el movimiento de electrones.

2.3.4.8. Ley de Gauss para campo eléctrico

La ley de Gauss explica que el flujo eléctrico neto a través de cualquier superficie en la cual este cerrada va hacer igual a la carga neta encerrada y está a su vez se divide por la permitividad al vacío, este contexto se puede deducir que el campo electico tiene su origen en carpa positivas, y el final termina en carga negativas. (Pávez Moreno, 2015)

2.3.4.9. Ley de Gauss para campo magnético

La ecuación del flujo magnético escrita por Gauss nos dice que el flujo magnético a través de una superficie la cual este cerrada va hacer (0), es decir que todas las líneas que entran en la superficie tienen que ser las misma al momento de salir. (Pávez Moreno, 2015)

2.3.4.10. Cálculo de la resistividad aparente y la fase

Sampson (2006) describe a la resistividad aparente como un parámetro electromagnético obtenido a partir de la relación entre los componentes del campo eléctrico y del campo magnético registrados en la superficie, normalizada por la frecuencia y la susceptibilidad magnética del espacio libre. La resistividad eléctrica de una muestra de roca se puede medir en el laboratorio, mientras que la resistividad aparente a una frecuencia dada debe considerarse como la resistividad promedio de un conjunto de materiales terrestres a una profundidad determinada.

A partir de cada elemento de impedancia Z_{ij} se calculan dos magnitudes complementarias. La primera es la resistividad aparente, que sigue la formulación de Cagniard (1953):

$$p_{a,ij} = \frac{|Z_{ij}|^2}{(\omega \cdot \mu)} (\Omega \cdot m) \quad (2.8)$$

Este valor demuestra la resistividad el cual tendría un medio homogéneo que produciría

la misma respuesta observada. El término 'aparente' subraya que no corresponde a una capa individual, sino a una combinación promediada del subsuelo atravesado.

La segunda magnitud es la fase, definida como el ángulo entre el campo eléctrico y el magnético:

$$\varphi, ij = \arctan \left(\frac{Im(Z_{ij})}{Re(Z_{ij})} \right) \text{ (Grados)} \quad (2.9)$$

La fase indica el desfase temporal: cuánto se adelanta o se retrasa el campo eléctrico respecto al magnético. Aporta información sobre cómo varía la resistividad con la profundidad. La interpretación en el método magnetotelúrico, la resistividad aparente y la fase se interpretan de forma conjunta siempre, porque proporcionan información complementaria y, al combinarse, reducen la ambigüedad en la determinación del modelo del subsuelo. Una curva de resistividad aparente acompañada de su curva de fase restringe mucho más el rango de modelos posibles que la resistividad por sí sola. (Sampson, 2006; Simpson & Bahr, 2005)

2.3.4.11. Interpretación de los valores de resistividad

Pávez Moreno, 2015, señala que una vez obtenido el modelo de capas, los valores de resistividad se pueden interpretar geológicamente con apoyo de rangos de referencia:

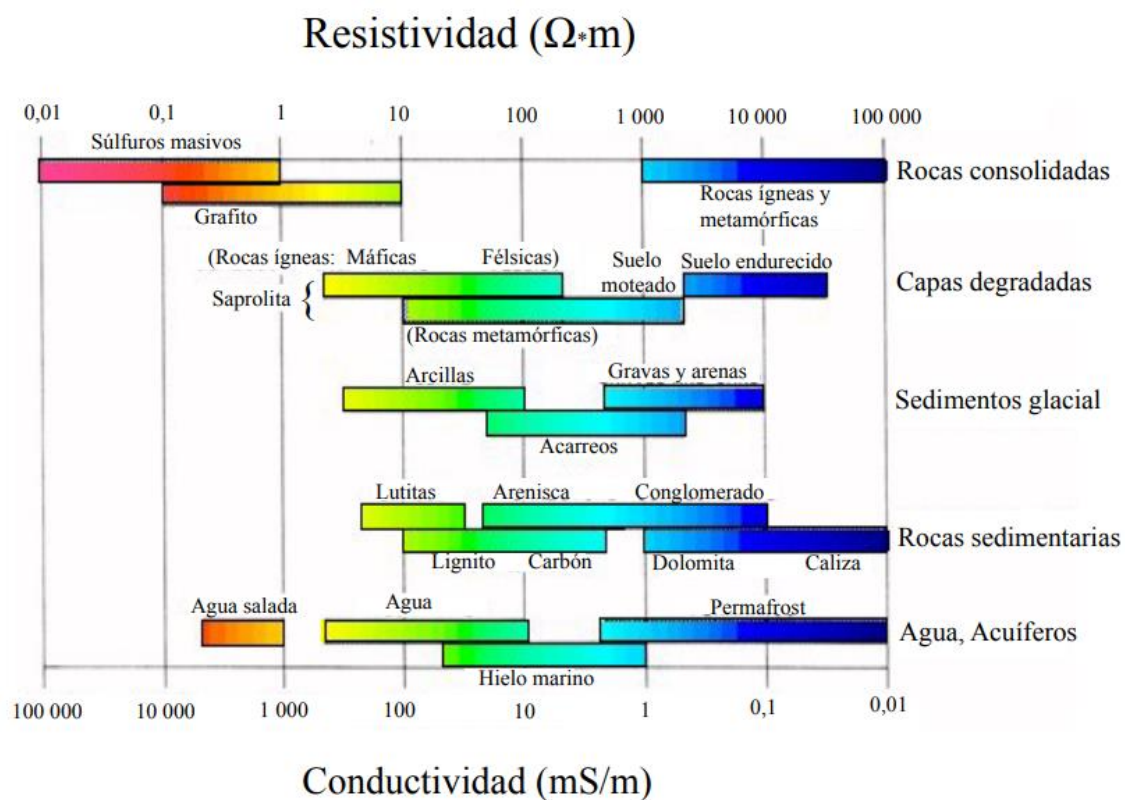


Figura 10. Variaciones más comunes del valor de resistividad para algunas rocas. Los límites pueden variar debido a fisuración, cantidad de agua, sales, etc. Gráfico modificado de Palacky (1987).

3. Capítulo III: Diseño de Proyecto

3.1 Tipo y enfoque de investigación

La investigación dada se considera aplicativa, ya que lo que se buscó fue el desarrollo de una plataforma inteligente orientada en la tarjeta Raspberry pi 4 modelo B, se adquirieron datos que fueron procesados y observados en tiempo real, respectivamente los datos magnetotélúricos, todo esto, con el objetivo de poder aportar herramientas tecnológicas, para el monitoreo del subsuelo dentro de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, en Manta.

Este estudio también, se caracterizó por tener un enfoque cuantitativo, ya que se analizó las variables como, los campos electromagnéticos naturales, la impedancia, la resistividad aparente y la fase. Asimismo, se describió las propiedades y características de las señales naturales, donde se evaluó el desempeño del sistema propuesto, finalmente la parte experimental, se logró la implementación y validación del equipo en condiciones reales.

3.2 Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en la costa central de Manabí - Manta, Ecuador en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí ($0^{\circ}57'10''$ de latitud sur y $80^{\circ}44'43''$ de longitud oeste). Esta región forma parte del litoral ecuatoriano, y existe una interacción entre la placa de Nazca y la placa Sudamericana, considerándose a esta zona en una zona sísmica y se convierte en un área de interés para estudios de riesgo sísmico.

Desde el punto de vista geológico, Manta se caracteriza por la presencia de depósitos de lutitas de color café a gris muy parecidas, monótonas, muy potentes de hasta 1.500 m, con intercalaciones subordinadas de areniscas tobáceas decimétricas y localmente nódulos calcáreos. Dependiendo de la posición geográfica también se puede encontrar depósitos orgánicos del cuaternario y areniscas finas a medias, depositadas en aguas poco profundas con

sedimentación irregular, entrecruzada. (Bonifaz García y Lascano Haro, 2017)

De acuerdo a lo expuesto, se empleó el método magnetotelúrico ya que resultó el método más adecuado para la caracterización del subsuelo de manera rápida y eficaz, en esta investigación se pudo obtener la distribución de resistividad eléctrica en profundidad a partir de la medición de los campos eléctricos y magnéticos naturales de la Tierra, sin necesidad de excavaciones o el uso de otros instrumentos artificiales. El seguimiento y monitoreo magnetotelúrico en el área de estudio permitió identificar si se encontraba en una zona de baja o alta resistividad, y finalmente se asoció a variaciones en la composición de las rocas, presencia de fluidos y estructuras geológicas relevantes del subsuelo para el análisis sísmico.

3.3. Arquitectura general del sistema

El sistema funcionó de manera que se pudo recopilar, adquirir, procesar y publicar los datos. Los sensores ubicados en el área de estudio captaron las magnitudes físicas de interés, y los electrodos no polarizados midieron los componentes del campo eléctrico natural del terreno, mientras que el magnetómetro fluxgate midió los componentes del campo magnético. Ambas señales analógicas se ingresaron al conversor ADS1256 de 24 bits, que se digitalizó con la ganancia adecuada para cada canal. Adicional se añadió el componente MPU-9250 y aportó los datos de vibración. Por último, el receptor GPS proveyó la referencia temporal precisa mediante la señal de pulso por segundo.

El procesamiento del cálculo de impedancia y resistividad aparente del subsuelo se ejecutó gracias a la tarjeta La Raspberry Pi 4B, por medio de las fórmulas de Cagniard, y con ello se detectó los eventos sísmicos y sincronización temporal de las muestras. Los resultados se distribuyeron a través de mensajería MQTT hacia la base de datos de series temporales InfluxDB, el tablero de visualización en tiempo real y, finalmente, hacia el acceso web mediante un túnel seguro. La Figura 11 representa este recorrido.

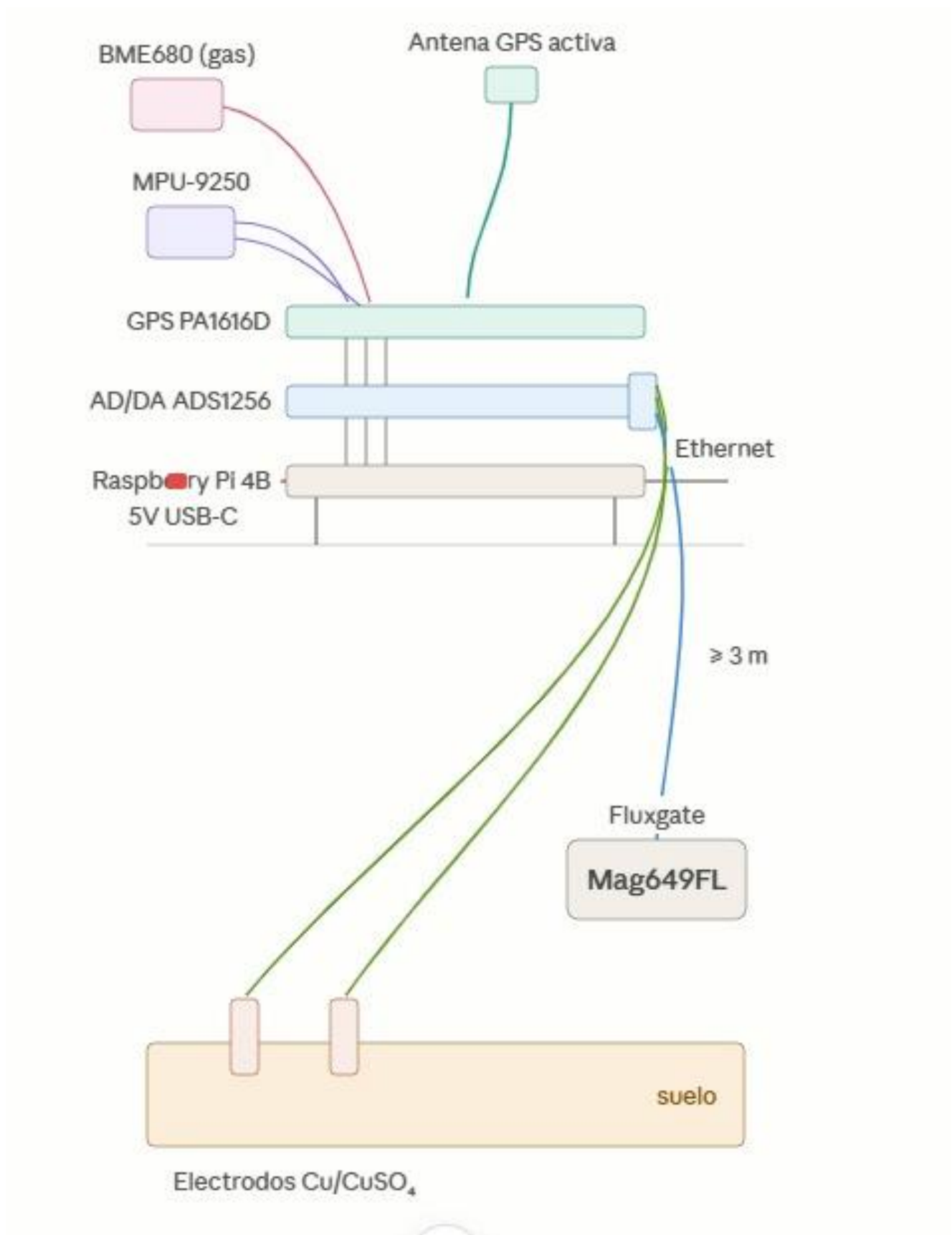


Figura 11. Diagrama general del sistema magnetotelúrico.

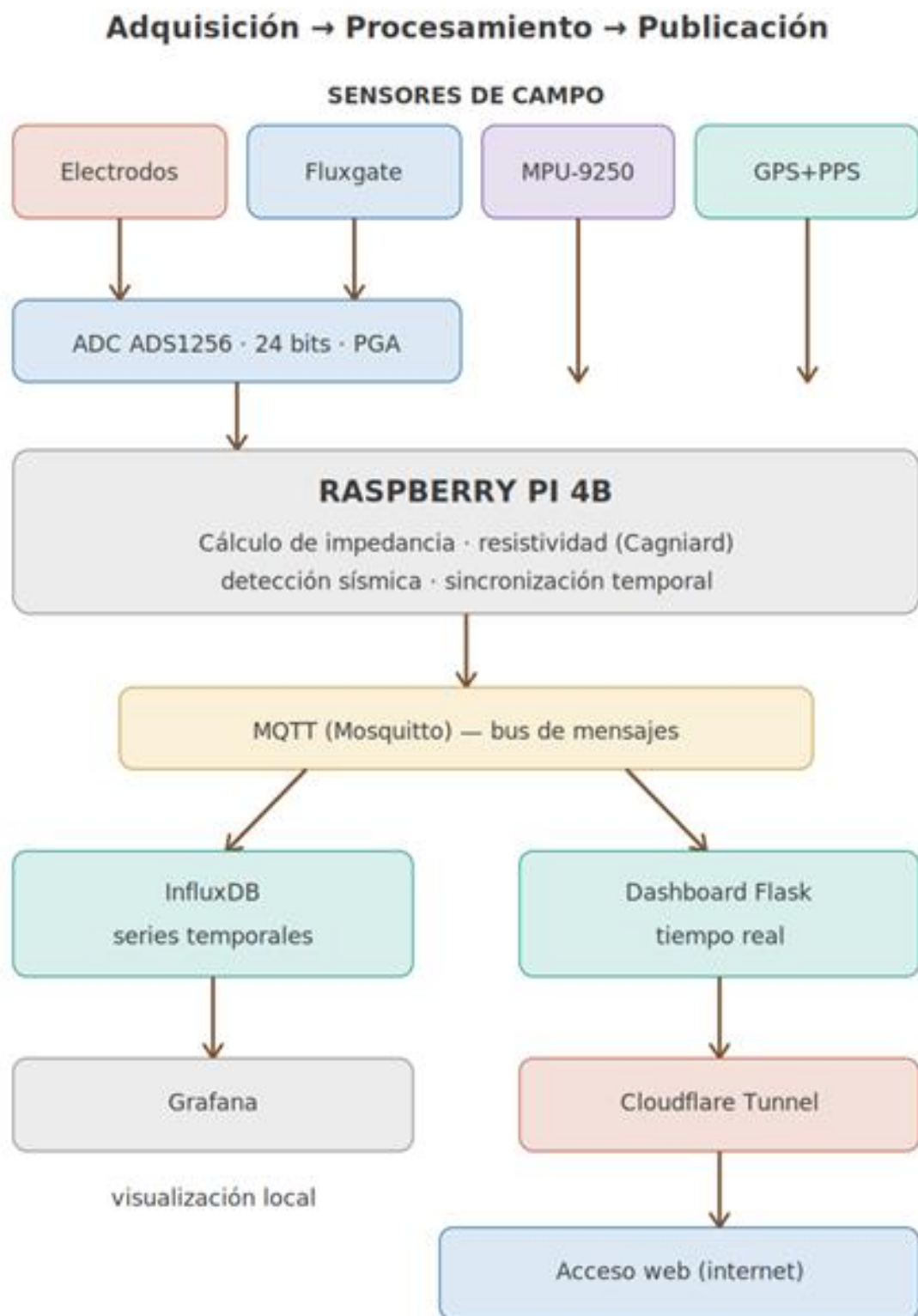


Figura 12. Diagrama de flujo de datos, desde la adquisición hasta la publicación web.

3.3.1 Arquitectura por capas

El sistema está constituido en cinco capas funcionales, siguiendo el modelo característico de las soluciones de Internet de las Cosas (IoT) son utilizadas para el monitoreo ambiental. Esta organización cumple un paso fundamental en la investigación ya que ayuda a comprender el sistema, donde cada capa tiene su funcionamiento definido.

La primera capa es la de adquisición la cual tenemos los electrodos y el magnetómetro encargados de la recolección de dato de los campos magnéticos y eléctricos, adicional tenemos el sensor de vibración y el GPS. La segunda capa viene siendo la conversión de los datos recolectados por el ADS su transformación es de datos analógicos a digital. La tercera capa es una de las mas importante la cual es la del procesamiento de datos ejecutada en la tarjeta de la Raspberry Pi. Cuando ya tenemos el procesamiento de datos la siguiente capa es la del almacenamiento donde se conserva los datos. Por último, la capa de presentación y acceso pone la información a disposición del usuario mediante tableros de visualización y un canal de acceso remoto que sea seguro. La Figura 13 ilustra esta estructura.

Arquitectura por capas del sistema

1 • Capa de adquisición (sensores)

Electrodos Cu/CuSO₄ (E) · Fluxgate Mag649FL (H)
MPU-9250 (vibración) · GPS PA1616D (tiempo)

2 • Capa de conversión

ADC ADS1256 24 bits · PGA por canal · 4 canales diferenciales

3 • Capa de procesamiento (edge · Raspberry Pi 4B)

Impedancia · resistividad aparente (Cagniard) · PGA sísmico
Python · MQTT · watchdog · tolerancia a fallos

4 • Capa de almacenamiento

InfluxDB (series temporales) · registros CSV locales

5 • Capa de presentación y acceso

Dashboard Flask (tiempo real) · Grafana (paneles)
Cloudflare Tunnel → acceso web seguro por internet

Los datos ascienden capa por capa, del fenómeno físico al usuario



Usuario / investigador

Figura 13. Arquitectura del sistema organizada en cinco capas funcionales.

3.3.2 Conexiones eléctricas

Desde el punto de vista de la implementación física, los componentes se interconectan a través del conversor ADS1256 y la Raspberry Pi 4 modelo B, que constituyen el núcleo de adquisición. Los 4 electrodos colocados en campo se conectan de la siguiente forma, los que están conectados de norte - sur, van en el puerto AD0 – AD1, los electrodos de este – oeste, están directamente conectado a AD2 – AD3, el dispositivo que recepta el campo magnético, que es el magnetómetro esta conectados de los puertos AD4 – AD5 – AD6 – AD7, la unidad inercial está conectada al bus FC, y el GPS aporta una señal que va conectada al pin GPI04, además de la conexión de la antena externa. El equipo tiene su propia fuente de alimentación, así como el magnetómetro para garantizar una buena distribución. La Figura 14 muestra estas conexiones.

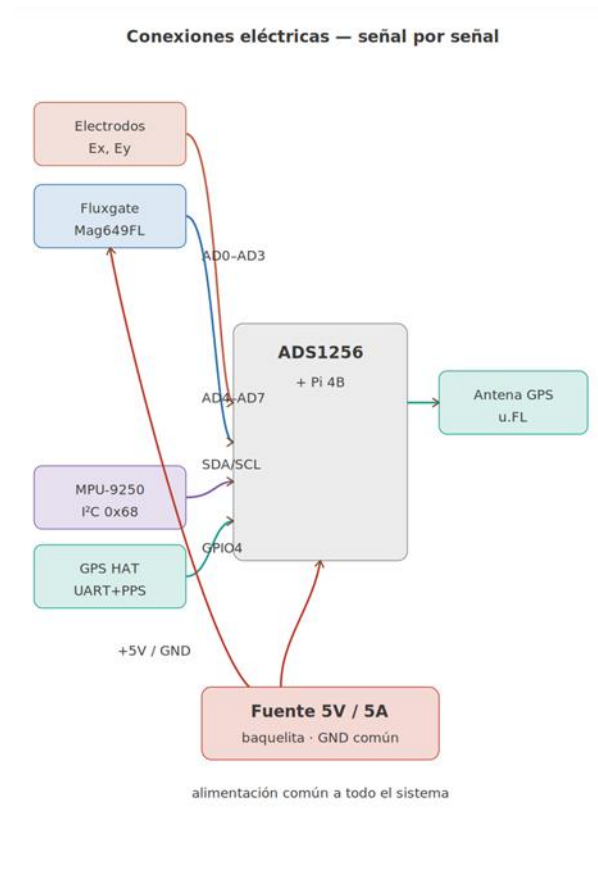


Figura 14. Esquema de conexiones eléctricas entre los sensores, el núcleo de adquisición y la alimentación.

3.3.3 Instalación y disposición de los sensores en campo

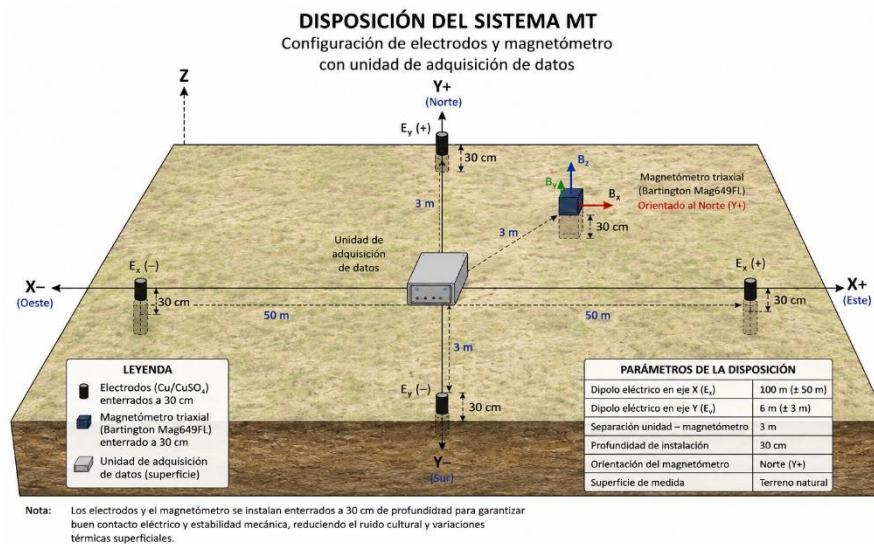


Figura 15. Disposición de electrodos, unidad de adquisición de datos y magnetómetro en el sistema MT.

Con el objetivo de recolectar las variaciones naturales de los campo eléctricos (E_x , E_y) y campo magnético (B_x , B_y) del subsuelo en la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí, se realizó la configuración compuesta por el electrodo no polarizado de cobre - sulfato de cobre, un magnetómetro fluxgate triaxial Bartington Mag649FL y una unidad de adquisición de datos y se utilizó Raspberry Pi 4B, el arreglo de los elemento se llevó a cabo considerando la orientación geográfica y las dimensiones del área de estudio.

La instalación de los electrodos se inició formando dos dipolos perpendiculares, en eje de las (x) corresponde a oeste – este, la cual cada electro no polarizado tiene una distancia de 50 metros desde su punto hasta la adquisición de datos como se muestra en la Figura 15, por lo siguiente en el eje de la (y), tenemos la orientación de norte – sur, donde la distancia de separación se llevó a cabo a 3 metros.

Para el magnetómetro fue orientado al norte, con una separación de 3 metros respecto a la unidad de adquisición de dato, esa separación se escogió para no tener posibles

interferencias electromagnéticas que sea iniciada por los componentes electrónicos del sistema. Finalmente, los electrodos no polarizados y el magnetómetro se enterraron a una profundidad de 30 cm.

3.4 Materiales y equipos utilizados

Para la implementación de la plataforma inteligente de monitoreo magnetotélúrico se empleó varios dispositivos electrónicos, sensores y herramientas de procesamiento, que se encargaron de la adquisición, digitalización, almacenamiento y visualización de los datos obtenidos en campo. Los principales equipos que se utilizaron y la respectiva función dentro del sistema son:

3.4.1. Electrodo no polarizado

Chongqing Gold M&E Equipment Co., Ltd. (2025) describe que los electrodos no polarizados se utilizan en estudios magnetotélúricos debido a su bajo potencial de polarización y sus propiedades eléctricas estables. Y sus propiedades eléctricas estables. Estos electrodos suelen consistir en un electrodo metálico en contacto con una solución electrolítica, lo que ayuda a reducir la diferencia de potencial entre el electrodo y el suelo circundante. Los electrodos no polarizados más comunes están hechos de plata – cloruro de plata (Ag/AgCl) o cobre – sulfato de cobre (Cu/CuSO₄)

Los electrodos de Ag/AgCl se caracterizan por mostrar una alta estabilidad y un bajo nivel de ruido eléctrico, y los convierten en una opción adecuada para aplicaciones de monitoreo a largos plazos y estudios que requieren alta resolución. También, los electrodos de Cu/CuSO₄ son una elección económica, por lo que se utilizan comúnmente en investigaciones de corto plazo en proyectos donde el costo sería un factor determinante. (Chongqing Gold M&E Equipment Co., Ltd., 2025)

Para realizar esta investigación se escogió el electrodo no polarizado Cu/CuSO₄, su selección es debido al bajo costo, facilidad de implementación y su estabilidad durante la adquisición de datos.



Figura 16. Electrodo no polarizados. Tomado de Chongqing Gold M&E Equipment Co, Ltd., 2025

3.4.2. Magnetómetro fluxgate triaxial Bartington Mag649FL

El Mag649 son magnetómetros que constan de un conjunto de tres sensores de compuerta de flujo (fluxgate) estabilizados mediante realimentación, dispuestos a lo largo de los ejes X, Y y Z. Cada eje proporciona una respuesta magnética altamente lineal, con baja histéresis y bajo acoplamiento cruzado entre ejes. Estas características, junto con el diseño compacto y un consumo de energía muy bajo, hacen que estos magnetómetros sean ideales para la vigilancia del perímetro con una red de multi-sensores. (Bartington Instruments, 2021).

El magnetómetro fluxgate triaxial Bartington Mag649FL fue utilizado en el presente proyecto debido a su alta sensibilidad y capacidad para medir las variaciones del campo magnético terrestre en tres ejes ortogonales (X, Y y Z). Este sensor emplea la tecnología fluxgate, la cual permite detectar campos magnéticos estáticos y dinámicos con un bajo nivel de ruido y una amplia respuesta en frecuencia, características fundamentales para aplicaciones geofísicas y magnetoteléuricas.



Figura 17. Magnetómetro fluxgate triaxial Bartington Mag649FL.
Fuente: autoría propia.

3.4.3. Raspberry Pi 4

De acuerdo con la página oficial de Raspberry Pi Ltd. (s. f.), señala que la Raspberry Pi 4 Modelo B cuenta con un procesador de cuatro núcleos de 64 bits de alto rendimiento, donde su resolución con pantallas es hasta 4K, esto se debe a que tiene puertos micro HDMI, el decodificador de vídeo por hardware tiene un alcance de hasta 4Kp60, hasta 8 GB de RAM, para el monitoreo tenemos la conexión LAN inalámbrica de doble banda de 2,4 GHz hasta 5 GHz, adicional cuenta con cuatro USB para el usuario final, la Raspberry Pi 4 Modelo B ofrece un rendimiento de escritorio comparable al de los sistemas PC x86 básicos. Este producto mantiene la compatibilidad con versiones anteriores de la Raspberry Pi 3 Modelo B+ y tiene un consumo energético similar, a la vez que ofrece mejoras sustanciales en velocidad de

procesador, rendimiento multimedia, memoria y conectividad. La LAN inalámbrica de doble banda y el Bluetooth cuentan con certificación de conformidad modular, Lo que permite integrar la placa en productos finales con una reducción significativa en las pruebas de conformidad, mejorando tanto el coste como el tiempo de comercialización.

La Raspberry Pi 4 Modelo B fue seleccionada como la unidad principal de procesamiento y control del sistema magnetotélúrico debido a su elevada capacidad computacional, bajo consumo energético y amplia compatibilidad con dispositivos de adquisición y comunicación.

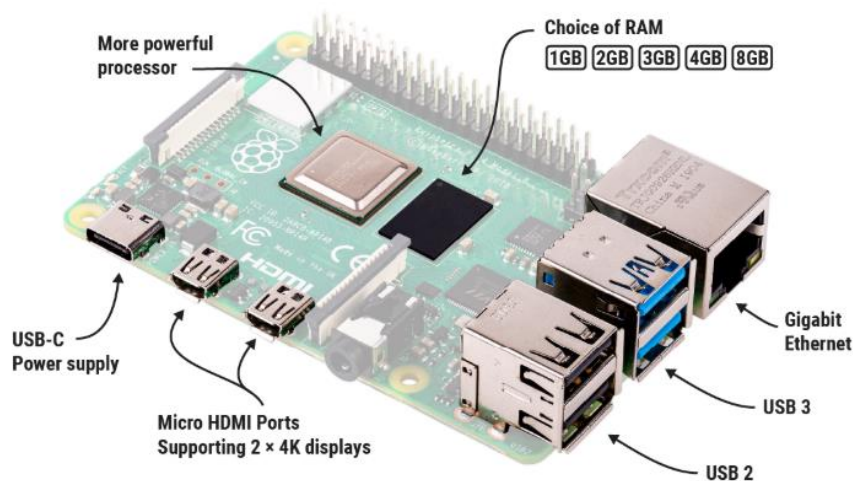


Figura 18. Raspberry Pi 4 Modelo B. Tomado de la página de Raspberry Pi Ltd. (s. f.),

3.4.4. Convertidores analógico-digitales (A/D) ADS1256

Los ADS1255 y ADS1256 son convertidores analógico-digitales (A/D) de 24 bits con un nivel de ruido extremadamente bajo. Ofrecen soluciones de medición completas de alta resolución para las aplicaciones más exigentes. (Texas Instruments, 2013)

Un multiplexor de entrada flexible gestiona señales diferenciales o de un solo extremo e incluye circuitos para verificar la integridad del sensor externo conectado a las entradas. El búfer de entrada seleccionable aumenta considerablemente la impedancia de entrada, y el amplificador de ganancia programable (PGA) de bajo ruido proporciona ganancias de 1 a 64 en pasos binarios. (Texas Instruments, 2013)

El filtro programable permite optimizar la resolución (hasta 23 bits sin ruido) y la velocidad de datos (hasta 30 000 muestras por segundo). Los convertidores ofrecen un ciclo de canales rápido para medir entradas multiplexadas y también pueden realizar conversiones únicas que se estabilizan en un solo ciclo. (Texas Instruments, 2013)

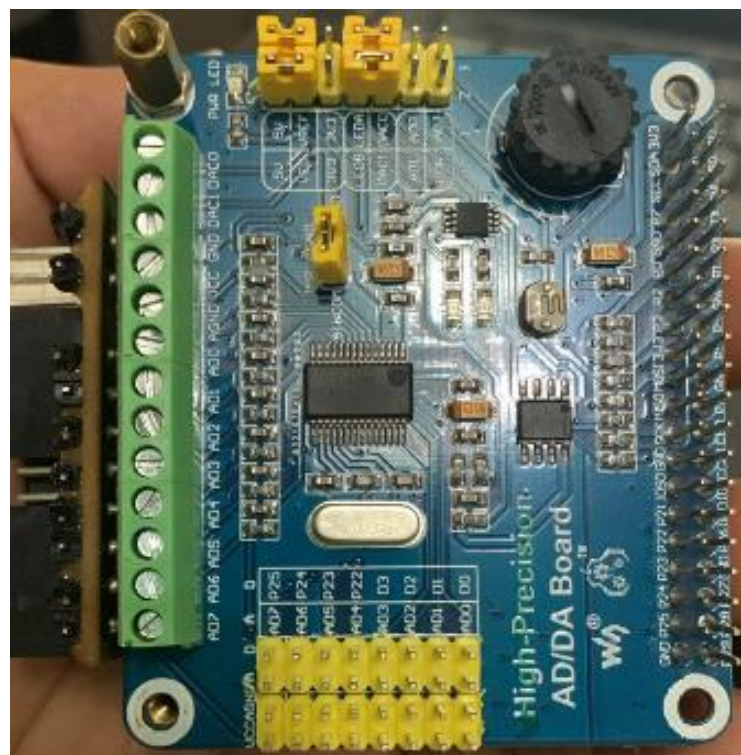


Figura 19. convertidores analógico-digitales (A/D) de 24 bits.

Fuente: autoría propia.

3.4.5. Adafruit Ultimate GPS hat

Back, 2017 señala que la incorporación de un receptor GPS a una Raspberry Pi le proporciona capacidades de posicionamiento y sincronización horaria de alta precisión. Ideal para determinar la ubicación de equipos en movimiento y para sistemas que requieren una sincronización horaria precisa.

El módulo Adafruit Ultimate GPS HAT facilita enormemente la incorporación de capacidades GPS a la Raspberry Pi, con la ventaja añadida de integrar también un reloj en tiempo real con batería de respaldo, además de un área para la creación de prototipos. (Back, 2017)

En este proyecto, el módulo GPS cumple una función fundamental en el georreferenciamiento de los puntos de medición, permitiendo asociar cada conjunto de datos adquiridos con una ubicación específica. Además de brindarnos su ubicación geofísica tiene incorporado el PPS (Pulse per second) que es fundamental para sincronizar los electros puesto en campo y magnetómetro obteniendo registro continuo y útil para el procesamiento de los datos. (Back, 2017)

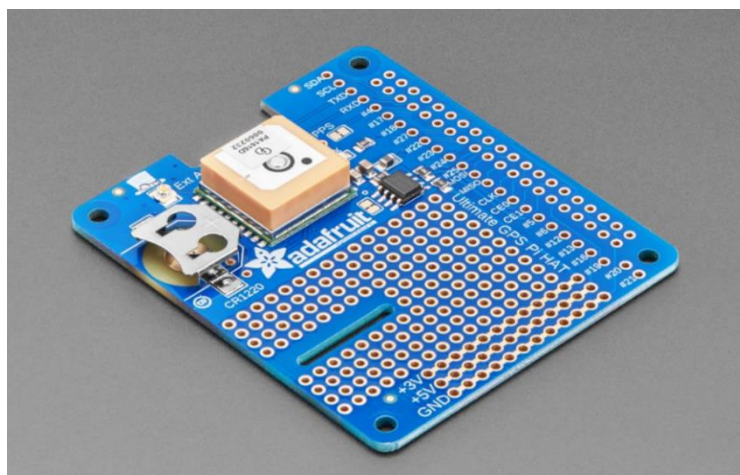


Figura 20. Módulo GPS. Tomado de Back, 2017.

3.4.6. Sensor de movimiento MPU9250

Módulo GY-9250 basado en el sensor IMU MPU9250 fabricado por InvenSense, El sensor contiene bases importantes para obtener datos como el rastreo de movimiento en 9 ejes, se combina 3 ejes para lo que es el acelerómetro, 3 ejes para el giroscopio y adicional tiene un magnetómetro que contiene 3 ejes, todo estos son integrados en la tarjeta MPU9250. (Naylamp Mechatronics, s. f.)

La comunicación se da con microcontroladores a través de la interfaz 12C, también tiene una librería completa para su utilización, es alimentado por un voltaje de 3.3 (V), para nuestro proyecto es conectado a la tarjeta convertidora ADS1256 la cual mantiene esa fuente de alimentación. (Naylamp Mechatronics, s. f.)

Para una recolección de dato más eficiente dentro de la parte de movimiento tiene un rango de escala programables de 250 grados/segundos, 500 grados/segundos, 1000 grados/segundos y 2000 grados/segundos estos rangos son para el giroscopio, para el acelerómetro tenemos un rango de 2 – 16g y el magnetómetro va desde los $\pm 4800\mu T$. (Naylamp Mechatronics, s. f.)

El MPU-9250 se utiliza para supervisar la estabilidad y la posición del sistema de adquisición durante las campañas de medición en campo. La información obtenida permite identificar posibles perturbaciones mecánicas, inclinaciones o vibraciones que puedan afectar la calidad de las señales registradas por los sensores principales, contribuyendo así a mejorar la confiabilidad de los datos adquiridos. Además, el módulo presenta un bajo consumo energético y dispone de interfaces de comunicación digital, como I²C y SPI, que facilitan su integración con la Raspberry Pi 4 y otros dispositivos electrónicos utilizados en el sistema. Gracias a su diseño compacto y a su capacidad para proporcionar mediciones en tiempo real, el MPU-9250 constituye una herramienta complementaria para el monitoreo y control del estado operativo del equipo. (Naylamp Mechatronics, s. f.)

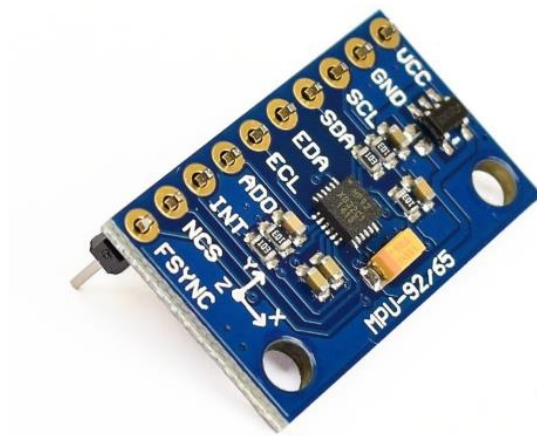


Figura 21. Sensor de movimiento MPU-9250.
Tomado de Naylamp Mechatronics, s. f.

3.4.7. Cable jumper (Dupont)

El cable jumper es aplicado para ser utilizado en equipo electrónicos, experimentos de circuitos, gracias a su capacidad que tiene al ser flexible y la confiabilidad de poder conectarse bien, por lo que su tenencia en el trayecto ha sido creciente. (Shenzhen Shengshengyuan Electronic Technology Co., Ltd., s. f.)

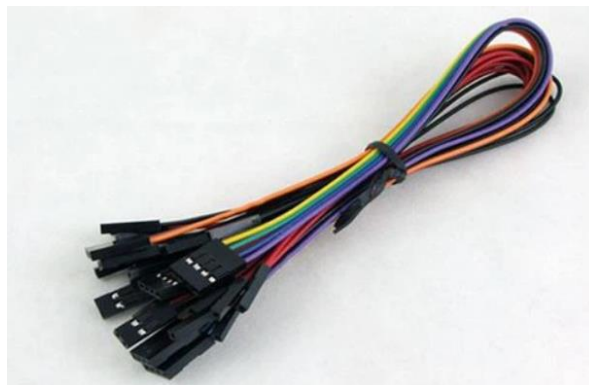


Figura 22. Cable jumper. Tomado de Shenzhen Shengshengyuan Electronic Technology Co., Ltd., s. f.

3.4.8. Ventilador de refrigeración

La función principal del ventilador es favorecer la circulación de aire dentro de la caja y facilitar la disipación del calor producido por los componentes electrónicos. De esta manera, se reduce el riesgo de sobrecalentamiento, disminución del rendimiento, errores en el procesamiento o apagados inesperados del sistema.



Figura 23. Ventilador. Fuente: autoría propia.

3.4.9. Fuente de alimentación

Con el propósito de garantizar el correcto funcionamiento de los diferentes componentes del sistema magnetoteléutico, se emplearon fuentes de alimentación independientes, seleccionadas de acuerdo con los requerimientos eléctricos de cada dispositivo.

Para la alimentación del magnetómetro fluxgate triaxial Bartington Mag649FL se utilizó una fuente de alimentación de 5 V y 5 A, capaz de proporcionar un suministro eléctrico estable y continuo durante las jornadas de adquisición de datos. Un paso importante en cada experimento es tener una correcta elección de las fuentes de alimentación a utilizar para que los equipos que este conectado no sea averiados.

Por otra parte, la tarjeta Raspberry Pi 4 Modelo B fue alimentados por una fuente de 5 (V) a 3 (A), adicional se utilizó otra con las mismas características para el convertidor analógico-digital ADS1256, el módulo Ultimate GPS HAT y el sensor MPU-9250. Esta configuración proporciona la energía necesaria para las tareas de adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos, garantizando un control seguro en la operativa del sistema.

Finalmente, para el sistema de ventilación encargado de disipar el calor generado por los componentes electrónicos, se empleó una fuente de alimentación independiente de 12 V. El uso de una fuente exclusiva para el ventilador permite mantener una temperatura adecuada de funcionamiento, evitando interferencias y asegurando el desempeño continuo del equipo durante largos periodos de monitoreo.

3.4.10. Router y sistema de Internet

Con el fin de garantizar el acceso remoto al sistema magnetotelégrafo, se implementó una conexión a internet que permite la transmisión y supervisión de los datos adquiridos en tiempo real. Esta conectividad es importante ya que nos brinda una herramienta de monitoreo continuo con el usuario.

Mediante la conexión a internet, la Raspberry Pi 4 se establece la comunicación con los servicios de almacenamiento y visualización, permitiendo acceder a la información en cualquier punto que tengan acceso a internet. Asimismo, la conectividad facilita el uso de Raspberry Pi Connect para la supervisión del estado operativo del equipo donde se pueda observar el estado de salud, la verificación del funcionamiento de los electrodos y magnetómetro, es fundamental este avance ya que se fue ver parámetros sin estar en la estación.

3.5 Procesamiento, almacenamiento y visualización de datos

Dentro del el sistema de monitoreo magnetotelúrico, se implementa una arquitectura de adquisición, transporte, almacenamiento y visualización de datos organizada en capas independientes. Esta separación permite que cada componente cumpla una función específica sin depender del estado de los demás, de modo que una falla en la visualización no interrumpe la adquisición ni el almacenamiento. A continuación, se va describiendo cada tecnología empleada y el flujo que siguen los datos desde el sensor hasta el usuario final.

3.5.1. Adquisición y procesamiento con Python

El núcleo del sistema es un programa escrito en Python 3, ejecutado de forma permanente sobre una Raspberry Pi mediante un servicio del sistema operativo. Este programa lee los canales del conversor analógico-digital de 24 bits, que digitaliza las diferencias de potencial captadas por los electrodos del campo eléctrico y las señales del magnetómetro de núcleo saturado correspondientes al campo magnético. Sobre estas lecturas, el programa aplica el procesamiento magnetotelúrico: primero hace el filtrado de datos prosigue con la transformada de Fourier, pasamos los datos de serie temporal al dominio de la frecuencia, calcula la impedancia a partir de la relación entre el campo eléctrico y el campo magnético ya obtenidos del dominio de la frecuencia, y de ella deriva la resistividad aparente según la formulación de Cagniard,⁰ así como la profundidad de penetración mediante la expresión del skin Depth. El uso de un entorno virtual de Python garantiza que las bibliotecas científicas empleadas —para cálculo numérico, procesamiento de señal y comunicación— permanezcan aisladas y sean reproducibles.

3.5.2. Transporte de datos con MQTT

Una vez procesadas, las mediciones se publican mediante el protocolo MQTT (Message Queuing Telemetry Transport), un estándar ligero de mensajería diseñado para telemetría en tiempo real. Un intermediario de mensajes (bróker) local recibe los datos y los distribuye a todos los componentes suscritos. La información que se obtiene es organizada en canales, un canal es para la resistividad eléctrica, otro para la posición geográfica, también tenemos para el sensor MPU la cual me da los datos de la inercial del acelerómetro y por último un canal para ver el estado de salud del hardware.

3.5.3. Almacenamiento con InfluxDB

Para conservar un registro histórico de las mediciones se emplea InfluxDB, una base de datos especializada en series temporales, es decir, optimizada para almacenar y consultar datos indexados por tiempo. Cada medición se guarda con su marca temporal, la ubicación del sitio y los valores de los campos eléctrico y magnético, la impedancia y la resistividad aparente. Esta base de datos permite recuperar posteriormente las mediciones para su análisis, graficar la evolución de las variables a lo largo del tiempo y alimentar procesos de interpretación como la inversión de resistividad. A diferencia del flujo en tiempo real —que muestra el instante presente—, el almacenamiento persistente hace posible el estudio retrospectivo de los datos, requisito indispensable para el análisis magnetotelúrico, que depende de registros prolongados.

3.5.4. Visualización avanzada con Grafana

La arquitectura que integra Grafana, es la obtención de una plataforma de visualización y análisis diseñada para representar series temporales provenientes de bases de datos como InfluxDB. Grafana constituye la capa de visualización del sistema donde el usuario podrá ver el final de los datos ya procesado, se conecta a los datos almacenados y permite construir

tableros con gráficas de evolución temporal y comparación entre variables. Estas tecnologías nos proporcionan una exploración de los registros acumulados, complementando la visualización inmediata que ofrece la interfaz propia del proyecto.

3.5.5. Interfaz de visualización en tiempo real

Para la supervisión inmediata del sistema se desarrolló una interfaz web propia en HTML, servida por un servidor ligero que se suscribe a los canales MQTT y transmite los datos al navegador mediante comunicación por sockets en tiempo real. Esta interfaz muestra, de forma continua y sin recargar la página, los valores instantáneos de resistividad aparente, impedancia, profundidad de penetración y los campos eléctrico y magnético, junto con gráficas en vivo de su evolución, el estado del posicionamiento por satélite y los indicadores de salud de cada sensor. Al estar construida sobre el mismo flujo MQTT que alimenta el almacenamiento, la interfaz refleja exactamente los datos que el sistema adquiere y guarda, ofreciendo al usuario una ventana directa al funcionamiento de la estación en el momento presente.

3.5.6. Flujo integral de los datos

En conjunto, el recorrido de la información sigue una cadena coherente: los sensores captan los campos naturales, el programa en Python los digitaliza y procesa, el resultado se publica por MQTT, y desde ese punto los datos se bifurcan hacia dos destinos complementarios —el almacenamiento histórico en InfluxDB, con su capa de visualización analítica en Grafana, y la interfaz web en HTML para la supervisión en tiempo real. La siguiente tabla resume la función de cada componente dentro de la arquitectura.

Tabla 1. Procesamiento, almacenamiento y visualización de datos

Tecnología	Función en el sistema
Python 3	Adquisición de los canales del conversor y cálculo magnetoteléurico (impedancia, resistividad aparente, profundidad de penetración).
MQTT	Transporte de las mediciones en tiempo real mediante publicación y suscripción, desacoplando la adquisición de los consumidores de datos.
InfluxDB	Almacenamiento persistente de las series temporales para su consulta y análisis posterior.
Grafana	Capa de visualización avanzada conectada al almacenamiento histórico, para tableros y análisis de la evolución de las variables.
Interfaz HTML	Visualización en tiempo real de los valores y gráficas instantáneas, servida al navegador mediante sockets sobre el flujo MQTT.

3.6 Flujo de procesamiento magnetotelúrico

3.6.1. Adquisición de señales eléctricas y magnéticas

El equipo magnetotelúrico no mide directamente la resistividad del sub suelo, el equipo mide señales que va a cambiar con respecto al tiempo.

Campo eléctrico.

$$E_x(t), E_y(t) \quad (3.1)$$

Las mediciones del campo eléctricos estarán dadas en señales muy pequeñas en la cual la obtendremos su diferencia potencial de los dos dipolos colocado perpendicularmente entre sí, orientados en los ejes (x), y (y), la diferencia de potencial es expresada en [mV], donde posteriormente se tiene que cambiar a (v/m), es importante considerar la separación en metros de cada dipolo hasta la el equipo, donde quedaría expresada la siguiente formula.

$$E = \frac{\Delta V}{L} \quad (3.2)$$

Donde:

- E: intensidad del campo eléctrico (V/m).
- ΔV : diferencia de potencial medida entre los electrodos (V).
- L: distancia de separación entre los electrodos (m).

Campo magnético.

Las mediciones del campo magnético son recogidas por el magnetómetro triaxial, sus

amplitudes son muy pequeñas y se expresan en nano teslas (nT), donde posteriormente se debe cambiar a (A/m) con la siguiente formula (2.3) del capítulo 2.

$$H = \frac{B}{\mu_0} \quad (2.3)$$

Donde:

- H: intensidad del campo magnético (A/m).
- B: densidad de flujo magnético medida por el sensor (T)
- μ_0 : permeabilidad magnética del vacío ($4\pi \times 10^{-7}$ H/m).

Estas 2 señales que se obtienen, son señales analógicas, la cual primero pasa por el ADS1256, donde son transformadas en dato digitales para que el Raspberry pi 4 modelo b pueda interpretar los datos, cuando ya los datos son almacenados en la tarjeta se realiza el procedimiento, que incluye las conversiones de las variables, filtrado, el análisis de la transformada de Fourier (FFT) y el cálculo de impedancia magnetotelúrica, para posteriormente obtener la resistividad y la fase.

3.6.2. Registro y almacenamiento de datos crudos

Ya adquirida las señales eléctricas y magnéticas con los electronos no polarizados y el magnetómetro, están señales pasaran por el convertido A/D ADS1256 y almacenada en la tarjeta de adquisición de datos en formas de datos crudo. Este registro de datos conserva las

mediciones originales de los dos campos obtenidos, sin aplicar ningún tipo de filtrado o procesamiento. Estos datos almacenados vienen dados de la diferencia potencial de los electrodos no polarizados, con su expresión en mV, y el campo magnético medidas por el magnetómetro en nano tesla (nT)

Es importante tener la recolección de estos datos, ya que es el primer paso para realizar las tareas de filtrado, conservación de unidades, para poder llegar al resultado esperado., en la siguiente tabla se adjunta los datos crudos de los campos magnéticos y eléctricos del día 14/07/2026 a partir de las 07:48:17. Se colocará los primeros 10 datos registrado posteriormente los datos registrado totales en el mismo día o cualquier otro día se podrá ver internamente en la carpeta Datos_MT_Crudos.

Tabla 2. Datos registrados de los campos eléctrico y magnético durante la adquisición magnetotelúrica.

Tiempo	Ex (mV)	Ey (mV)	Hx (nT)	Hy (nT)
O7:48:17	441	-426.6	-21352.75	-12738.13
O7:48:18	430	-428	-21350.54	-12591.88
O7:48:19	444	-428	-21352.79	-12850.1
O7:48:20	100	-421	-21351.79	-12694.45
O7:48:21	409	-449	-21350.74	-12583.1
O7:48:22	399	-435	-21350.23	-12570.88
O7:48:23	411	-424	-21350.29	-12749.84
O7:48:24	399	-423	-21352.63	-13417.69
O7:48:25	436	-419	-21351.98	-12714.82
O7:48:26	428	-435	-21351.11	-12634.17

3.6.3. Filtrado.

En el mejoramiento de las señales que son recolectada por los electrodos no polarizados y el magnetómetro, se cumple con una etapa de procesamiento a detectar y reducir posibles valores atípico, al momento de almacenar las señales crudas de los electrodos y magnetómetro, se calcula el valor promedio de un conjunto de muestra, con la siguiente formula:

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (3.3)$$

Donde:

- $\bar{x}$ es el valor promedio de las muestras.
- x_i representa a la medición registrada.
- N es el número total de muestras consideradas.

En este paso se puede identificar como valores atípicos aquellas mediciones que tenga un rango de diferencia mayor con relación al comportamiento general de las señales, estos datos atípicos pueden ser generados por interferencias externas, perturbaciones electromagnéticas o errores durante la adquisición de datos.

Al pasar por este paso obtenemos señales más estables para el proceso posterior que sería la transformada de la Fourier (FTT), el cálculo de la impedancia (z) la estimación de la resistividad aparente.

3.6.4. Ampliación de la FFT

Dentro del método magnetotelúrico la transformada de Fourier cumple un rol muy importante ya que es la herramienta matemática capaz de transformar las señales recolectada (eléctricas y magnéticas) en función al dominio de la frecuencia. Lo que permite identificar las diferentes componentes frecuenciales que se puede recolectar de los electrodos no polarizados y el magnetómetro, la cual se obtiene con la siguiente formula:

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j\frac{2\pi kn}{N}} \quad (3.4)$$

donde:

- $X(k)$ representa la señal en el dominio de la frecuencia.
- $x(n)$ corresponde a la señal original en el dominio del tiempo.
- N es el número total de muestras analizadas.
- n es el índice temporal.
- k representa la frecuencia analizada.
- j es la unidad imaginaria.

Cálculo de la impedancia.

Cuando ya tengamos realizado la FFT, las señales recogidas de los electrodos y el magnetómetro pasaran hacer del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

$$E(t) \rightarrow E(f)$$

$$H(t) \rightarrow H(f)$$

Ya obteniendo este resultado ya podemos encontrar la impedancia magnetotelúrica para cada frecuencia seleccionada, su forma básica es la siguiente

$$Z(f) = \frac{E(f)}{H(f)} \quad (3.5)$$

Un dato importante ya que tenemos para obtener buenos resultados, ya que tenemos dos componentes horizontales, se trabaja normalmente con las componentes cruzadas, para Z_{xy} , se relaciona el campo eléctrico medido en el eje X, con el campo magnético medido en el eje Y, para la Z_{yx} se relación el campo eléctrico medido en Y y el campo magnético medido en X

$$Z_{xy}(f) = \frac{E_x(f)}{H_y(f)} \quad (3.6)$$

$$Z_{yx}(f) = \frac{E_y(f)}{H_x(f)} \quad (3.6)$$

Al obtener la impedancia me da valores complejos, con esos valores podemos sacar la magnitud y su fase.

$$Z(f) = Z_{real}(f) + jZ_{imaginario}(f) \quad (3.7)$$

$$|Z(f)| = \sqrt{Z_{real}^2 + Z_{imaginario}^2} \quad (3.8)$$

$$\varphi(f) = \tan^{-1}\left(\frac{Z_{imaginaria}}{Z_{real}}\right) \quad (2.9)$$

3.6.5. Cálculo de la resistividad aparente.

Después de obtener la impedancia aparente podemos realizar el cálculo de la resistividad para el análisis de la investigación obteniendo el uso de la siguiente formula. (2.8)

$$p_a(f) = \frac{|Z(f)|^2}{\mu_0 2\pi f} \quad (2.8)$$

4. Capítulo IV: Resultados y análisis

En este capítulo vamos a presentar los resultados obtenidos mediante la plataforma magnetotelúrica desarrollada. Se analizan las señales eléctricas y magnéticas registradas durante las pruebas de campo por los electrodos y el magnetómetro, así como los parámetros calculados a partir de ellas la cual fueron procesados y analizados, entre los que se encuentran tenemos, la impedancia magnetotelúrica, la resistividad aparente y la fase.

Además, se realiza una interpretación de los datos obtenidos y una comparación con estudios previos relacionados con el método magnetotelúrico, con el objetivo de evaluar el desempeño del sistema implementado en el campo de la universidad.

4.1 Preparación del terreno e instalación de los sensores

En la Figura 24. podemos observar unas de las etapas en el proceso del equipo, se observa la excavación del terreno en la cual se tuvo que hacer zanjas de diferentes distancias, donde 2 son de 50 metros y 3 zanjas de 3 metros, las distancias de 3 metros la hemos utilizados para los electrodos no polarizados que están ubicados de norte – sur, la otra zanjas es para el magnetómetro ubicado en dirección al norte, se utilizó manguera de media pulgada la cual por su flexibilidad ayudo a un mejor uso en el terreno, para obtener mejor respuesta en los datos se aplicó sulfato de cobre en las zonas donde fueron puesta los electrodo no polarizados, para tener una mejorar conductividad eléctrica entre el electrodo y el suelo. Este proceso permite incrementar la ionización y minimizar la resistencia de contacto.



Figura 24. Preparación del terreno para la introducción de mangueras que cumplirán la función de protección de los cables. Fuente: autoría propia.



Figura 25. Con el uso adecuado del instrumento se realizó un hoyo de 30 cm de profundidad para ubicar los electrodos. Fuente: autoría propia.

4.2 Montaje del sistema magnetotelúrico en campo

El sistema desarrolla se instaló después de colocar los electrodos y el magnetómetro, la puesta en marcha es ubicada correctamente en el área de estudio, para su funcionamiento se conectaron los 4 electrodos a la tarjeta de convertidora analógico – digital, en los puertos A0, A1, A2, A3, para el magnetómetro su conexión es en los puertos A4, A5, A6, A7.

Se llevó a cabo la siguiente conexión en la cual se conectó la fuente de alimentación para la tarjeta, los ventiladores y el sistema de internet para poder monitorear de forma remota los resultados obtenidos

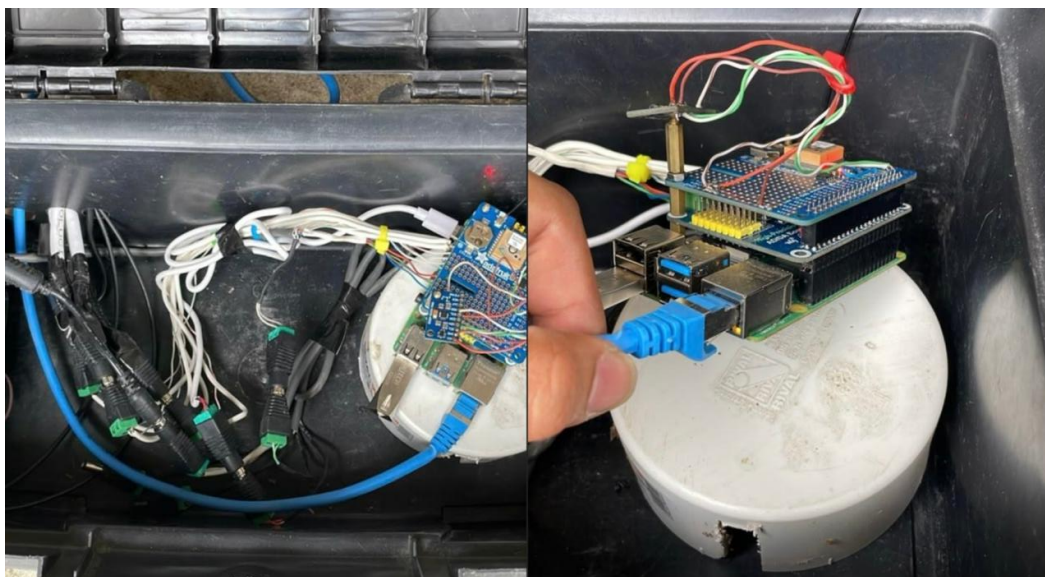


Figura 26. Montaje del sistema magnetotelúrico en campo. Fuente: autoría propia.

4.3 Resultados de las señales eléctricas y magnéticas

En la Figura 26 se puede visualizar cómo se comporta el campo eléctrico registrada por el sistema, la cual la curva azul corresponde a la componente E_x , orientada a la dirección norte – sur, mientras que la curva amarilla corresponde E_y , ubicada en este – oeste.

Se puede evidenciar que ambas señales realizan fluctuaciones continuas alrededor de un valor medio, lo que puede evidenciar que tenemos variaciones naturales, como se mencionó en capítulos anteriores, estas variaciones son producidas como consecuencia de fenómenos externos que son provocados por vientos solares y relámpagos.

Durante el tiempo de la recolección de datos, no se identificaron cambios bruscos, tampoco obtuvimos interrupciones en el sistema.



Figura 27. Variación temporal de los campos eléctricos E_x y E_y .

En la figura se puede evidenciar que la curva verde representa a H_x , orientada a los planos norte – sur, la curva morada corresponde a H_y , orientada al este – oeste. Se puede demostrar que los componentes H_y están fluctuando en 2500 nT, mientras que los componentes H_x permanece constante, estos datos obtenidos demuestran que el sistema tiene la capacidad de registrar continuamente las variaciones para los cálculos posteriores.



Figura 28. Variación temporal de las componentes del campo magnético Hx y Hy.

4.4 Resultados obtenidos mediante la plataforma desarrollada

Los resultados obtenidos se demuestra el adecuado funcionamiento de la plataforma para la adquisición y procesamiento de MT, A partir de los datos recolectados por los electrodos y el magnetómetro, es posible calcular parámetros geofísicos como la impedancia, la resistividad aparente y la fase.

El valor obtenido de la resistividad aparente es aproximado de $55,8 \Omega \cdot m$, lo que sugiere la presencia de materiales de conductividad dentro del lugar de estudio. Por lo siguiente también obtenemos dentro de la plataforma el valor de la impedancia la cual tiene un valor de $1,671 m\Omega$, se evidencia la relación que existe entre los campos.

Con la fórmula de profundidad de penetración, el sistema estimo una profundidad de estudio de 3758 m, Sin embargo, este valor corresponde a una aproximación teórica basada en la frecuencia y también en la resistividad obtenida, por lo que se requieren estudios complementarios para validar la estructura geológica del subsuelo.

En definitiva, se puede observar en tiempo real todos los parámetros calculados, para

poder tener el control del monitoreo continuo y el almacenamiento de la información obtenida.

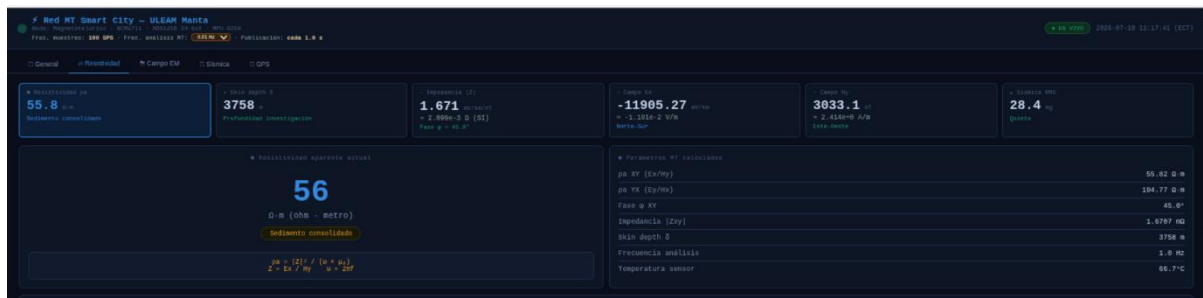


Figura 29. Dashboard para la visualización de parámetros magnetotélúricos en tiempo real.

4.5 Discusión de resultados

El equipo registro una resistividad aparente aproximada de 55,8 $\Omega \cdot m$ al comparar el valor con los rangos típicos de la resistividad mostrada en la *figura 10* que señala los diferentes materiales geológicos, se puede evidenciar que corresponde a materiales sedimentarios, como arcillas, arenas, lutitas y depósitos parcialmente consolidados.

Los valores obtenidos de la resistividad muestran concordancia con estudio relacionado con el subsuelo de manta, y se relaciona con el estudio, Chunga 2016 y menciona que, a más profundidad, de la secuencia sedimentaria descrita precedentemente, se inicia los niveles de arcilla de alta plasticidad, con presencia de abundantemente restos carbonosos, así como tonalidades rojizas indicadoras de ambiente de oxidación. Niveles de arena, arena arcillosa, arcilla y limo son intercaladas los cuales dependieron de su ambiente sedimentario deposicional y del avance y retroceso del nivel de mar, el cual es el factor principal para comprender los diferentes tipos de sedimentos identificados en el área de estudio.

Conclusión

1. Dentro de este estudio se llevó a cabo el diseño e implementación del equipo magnetoteléxico la cual se realizó dentro de la tarjeta raspberry pi 4 modelo b, donde se obtuvo 3 puntos clave que son la adquisición de datos, el procesamiento y la visualización en tiempo real.
2. El sistema permite recolectar datos continuamente la cual nos ayuda a tener una serie de datos para su procesamiento. Los resultados obtenidos presentaron valores de resistividad aparente coherentes con materiales sedimentarios presente en la ciudad de Manta, materiales como: arenas, limos y arcillas, de acuerdo con estudios realizados en la zona, precisamente en Tarqui.
3. La profundidad de investigación obtenida equivale a una estimación teórica basada en la frecuencia del análisis y en la resistividad aparente, el sistema fue realizado con herramienta tecnológica de bajo costo, con potencial para futuras aplicaciones, en el estudio del subsuelo y el monitoreo de ciudad inteligente.
4. Finalmente, este proyecto se obtuvo con mucha satisfacción cumplida donde se contribuye al fortalecimiento de la formación académica del área de la geofísica aplicada brindando una base para el crecimiento de futuras investigaciones.

Recomendaciones

Considerando lo importante de la investigación y en función a los resultados obtenidos se sugiere tanto a los docentes y estudiantes de la comunidad educativa de la Universidad Laica Eloy Alfaro de Manabí las siguientes recomendaciones;

Seguir la línea de investigación del estudio del subsuelo ya que se tiene una base completa, técnica y económica que servirá para los futuros estudios del mismo, de tal manera podrá ser implementados por futuros tesis o para trabajos prácticos – experimentales en clases, que enriquecerán el saber.

Deberán implementar programas destinados a perfeccionar y motivar a la comunidad educativa para actualizar la información anual de los campos magnéticos para que de ese modo se pueda analizar las diferentes fluctuaciones de ondas en el tiempo, y así obtener información importante a futuro acerca del subsuelo.

Bibliografía

1. Akasofu, S, I. (2003). Aurora. En R. A. Meyers (Ed.), Encyclopedia of Physical Science and Technology (3.^a ed., pp. 793–803). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B0-12-227410-5/00045-4>
2. Back, A. (2017, 27 de marzo). Add GPS Time and Location to a Raspberry Pi Project. DesignSpark. <https://www.rs-online.com/designspark/add-gps-time-and-location-to-a-raspberry-pi-project>
3. Bartington Instruments. (2021). Mag648 & Mag649 Low Power Three-Axis Magnetic Field Sensors.
4. Bonifaz García, H y Haro Lescano, J. (2027). Tipos de perfil de suelo para diseño sísmico en Manta, Portoviejo, Chone y Bahía de Caráquez ciudades afectadas por el sismo del 16 Abril del 2016. Universidad Central del Ecuador and Universidad de

5. Cano Gordillo, C. comunicación personal, 12 de septiembre de 2025.
6. Caragliu, A., & Del Bo, C. (2020). Do smart city policies work? Digital transformation of the design, construction and management processes of the built environment, 149–159.
7. Chongqing Gold M&E Equipment Co., Ltd. (2025, 27 de noviembre). How to choose the right electrodes for a magnetotelluric system?
<https://www.cqtopgeo.com/blog/how-to-choose-the-right-electrodes-for-a-magnetotelluric-system-1909690.html>
8. Chunga, K. (2016). Estudio de geología de superficie y subsuelo para el estudio geotécnico y de riesgo sísmico de la zona Tarqui de la ciudad de Manta de acuerdo a la Norma Ecuatoriana de la Construcción 2015 (Informe técnico No. KC092016). Universidad Técnica de Manabí.
https://www.researchgate.net/publication/327729687_Estudio_de_geologia_de_superficie_y_subsuelo_para_el_estudio_geotecnico_y_de_riesgo_sismico_de_la_zona_Tarqui_de_la_ciudad_de_Manta_de_acuerdo_a_la_Norma_Ecuatoriana_de_la_Construcion_2015
9. Dmitriev, V. I., & Berdichevsky, M. N. (1979). The fundamental model of magnetotelluric sounding. *Proceedings of the IEEE*, 67(7), 1034-1044.
10. Fondo de Población de las Naciones Unidas (2007). Estado de la población mundial 2007. Liberar el potencial del crecimiento urbano. Nueva York: UNFPA.
11. GAMA Geofísica. (s. f.). Métodos eléctricos. <http://www.gama-geofisica.com/vers20-06b-generada-lin/code/htmldocs/es/metodosgeofisicos/3-metodos-electricos.html>
12. GAMA Geofísica. (s. f.). Métodos electromagnéticos. <http://www.gama-geofisica.com/vers20-06b-generada-lin/code/htmldocs/es/metodosgeofisicos/3-metodos-electricos.html>

- geofisica.com/vers20-06b-generada-
lin/code/htmldocs/es/metodosgeofisicos/6-metodos-electromagneticos.html
13. GAMA Geofísica. (s. f.). Métodos geofísicos. <http://www.gama-geofisica.com/vers20-06b-generada-lin/code/htmldocs/es/metodosgeofisicos.html>
14. GAMA Geofísica. (s. f.). Georradar (GPR). <http://www.gama-geofisica.com/vers20-06b-generada-lin/code/htmldocs/es/metodosgeofisicos/4-georadar-gpr.html>
15. GAMA Geofísica. (s. f.). Métodos potenciales. <http://www.gama-geofisica.com/vers20-06b-generada-lin/code/htmldocs/es/metodosgeofisicos/5-metodos-potenciales.html>
16. GAMA Geofísica. (s. f.). Métodos sísmicos. <http://www.gama-geofisica.com/vers20-06b-generada-lin/code/htmldocs/es/metodosgeofisicos/2-metodos-sismicos.html>
17. González, N. (2025, 1 de agosto). ¿Qué es el viento solar? NASA Ciencia. <https://ciencia.nasa.gov/sistema-solar/que-es-el-viento-solar/>
18. Gupta, H., & Roy, S. (2007). Chapter 5 - Exploration techniques. En Geothermal energy (pp. 61–119). Elsevier. ISBN 9780444528759 <https://doi.org/10.1016/B978-044452875-9/50005-8>
19. Institut Cartogràfic i Geològic de Catalunya. (s. f.). Magnetotelúrica. <https://www.icgc.cat/es/Ambitos-tematicos/Territorio-sostenible/Subsuelo/Geofisica-aplicada/Tecnicas/Magnetotelurica>
20. Instituto Geofísico (2026). Peligro sísmico. <https://www.igepn.edu.ec/peligro-sismico>
21. Instituto Latinoamericano de la Comunicación Educativa. (s. f.). El campo

- magnético terrestre. Biblioteca Digital del ILCE.
https://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen3/ciencia3/114/htm/sec_7.htm
22. McPherron, R.L. (2026, July 4). Geomagnetic field. Encyclopedia Britannica.
<https://www.britannica.com/science/geomagnetic-field>
23. National Aeronautics and Space Administration. (s. f.). What is the solar wind? NASA Science. <https://science.nasa.gov/sun/what-is-the-solar-wind/>
24. National Oceanic and Atmospheric Administration. (s. f.). Earth's magnetosphere. Space Weather Prediction Center.
<https://www.spaceweather.gov/phenomena/earths-magnetosphere>
25. Naylamp Mechatronics. (s. f.). Módulo MPU9250: Acelerómetro, giroscopio, magnetómetro I2C. <https://naylampmechatronics.com/sensores-posicion-inerciales-gps/214-modulo-mpu9250-acelerometro-giroscopio-magnetometro-i2c.html>
26. Pavez Moreno, M, A. (2015). *Estudio de resistividad eléctrica mediante magnetotelúrica, en la zona de falla Liquiñe-Ofqui entorno volcán Villarrica*. [Tesis de maestría, Universidad de Chile]. Universidad de Chile.
27. PwC, IE Business School y Telefónica. (2015). Smart Cities. La transformación digital de ciudades. Disponible en: <https://m2m.telefonica.com/libroblanco-smart-cities/media/libro-blanco-smart-cities-esp-2015.pdf>
28. Raspberry Pi Ltd. (s. f.). Raspberry Pi 4 Model B specifications. Raspberry Pi.
<https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-4-model-b/specifications/>
29. Rodríguez Rodríguez, I; Campo Valera, M; Calderon Fajardo, V. (2023). Conectando el Futuro: Ciudades Inteligentes, IoT y la Transformación de la Sociedad Urbana dentro de este contexto la geofísica. UMA Editorial. Universidad de Málaga. <file:///C:/Users/ESTUDIO/Downloads/Dialnet-ConectandoElFuturo-973010.pdf>

30. Scivetti, N., & Bahía, M., Spagnuolo, J. (2021). Manual de geofísica y métodos geofísicos. *Bahía blanca, Argentina: Universidad Nacional del Sur*. https://ediuns.com.ar/wp-content/uploads/2021/08/Manual-de-Geofisica-y-metodos-geofisicos_web.pdf
31. Secretaría del Convenio sobre la Diversidad Biológica. (2012). Perspectiva de las ciudades y la diversidad biológica. Resumen ejecutivo. (p. 16). Montreal, Canadá. <https://www.cbd.int/authorities/doc/cbo-1/cbd-cbo1-summary-sp-f-web.pdf>
32. Sampson, J. A. (2006). Two-dimensional magnetotelluric model of deep resistivity structure in the Bodie-Aurora district of California (Open-File Report 2006-1060). U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.3133/ofr20061060>
33. Shenzhen Shengshengyuan Electronic Technology Co., Ltd. (s. f.). What is the Dupont wire? <https://www.wire-harness.net/news/what-is-the-dupont-wire-56256334.html>
34. Simpson, F., & Bahr, K. (2005). Practical magnetotellurics. Cambridge University Press.
35. SimScale. (2026). What is electromagnetic induction? SimScale Documentation. <https://www.simscale.com/docs/simwiki/electromagnetics/what-is-electromagnetic-induction/>
36. Suárez, Marta (2016). De las smart cities a los smart citizens. La ciudadanía frente a la tecnología en la construcción de resiliencia urbana. URBS. Revista de Estudios Urbanos y Ciencias Sociales, 6(2), 121-128. http://www2.ual.es/urbs/index.php/urbs/article/view/suarez_casado
37. Suramericana. (2020, 11 de noviembre). Descargas eléctricas atmosféricas. Origen, impactos y sistemas de protección.

https://suramericana.com/blog/salud_planetaria/descargas-electricas-atmosfericas

38. TEMcompany. (s. f.). *Why use geophysics? Understand the Earth's composition*. <https://www.temcompany.com/es/research/why-use-geophysics/>
39. UCAR Center for Science Education. (s. f.). The ionosphere. <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/ionosphere>
40. Texas Instruments. (2013, septiembre). Very low noise, 24-bit analog-to-digital converter (Rev. K) (ADS1255/ADS1256 datasheet). <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ads1256.pdf>
41. Udías, A. y Mezcuca, J., 1997. Fundamentos de geofísica (p 19-35). Alianza Editorial.
42. Villarroel, C. D. (s.f.). Unidad 1: Prospección Geofísica. <https://fcen.uncuyo.edu.ar/catedras/unidad-1.pdf>
43. U.S. Environmental Protection Agency. (2026). Electromagnetic signal attenuation (skin depth). <https://www.epa.gov/environmental-geophysics/electromagnetic-signal-attenuation-skin-depth>
44. University Corporation for Atmospheric Research. (s. f.). Ionosphere. UCAR Center for Science Education. <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/ionosphere>
45. Universidad de Las Palmas de Gran Canaria. (s. f.). Propagación de ondas electromagnéticas. <https://www2.ulpgc.es/hege/almacen/download/27/27199/propagacion.pdf>

Anexos

Fotografías de la instalación.





}



Instalación del internet

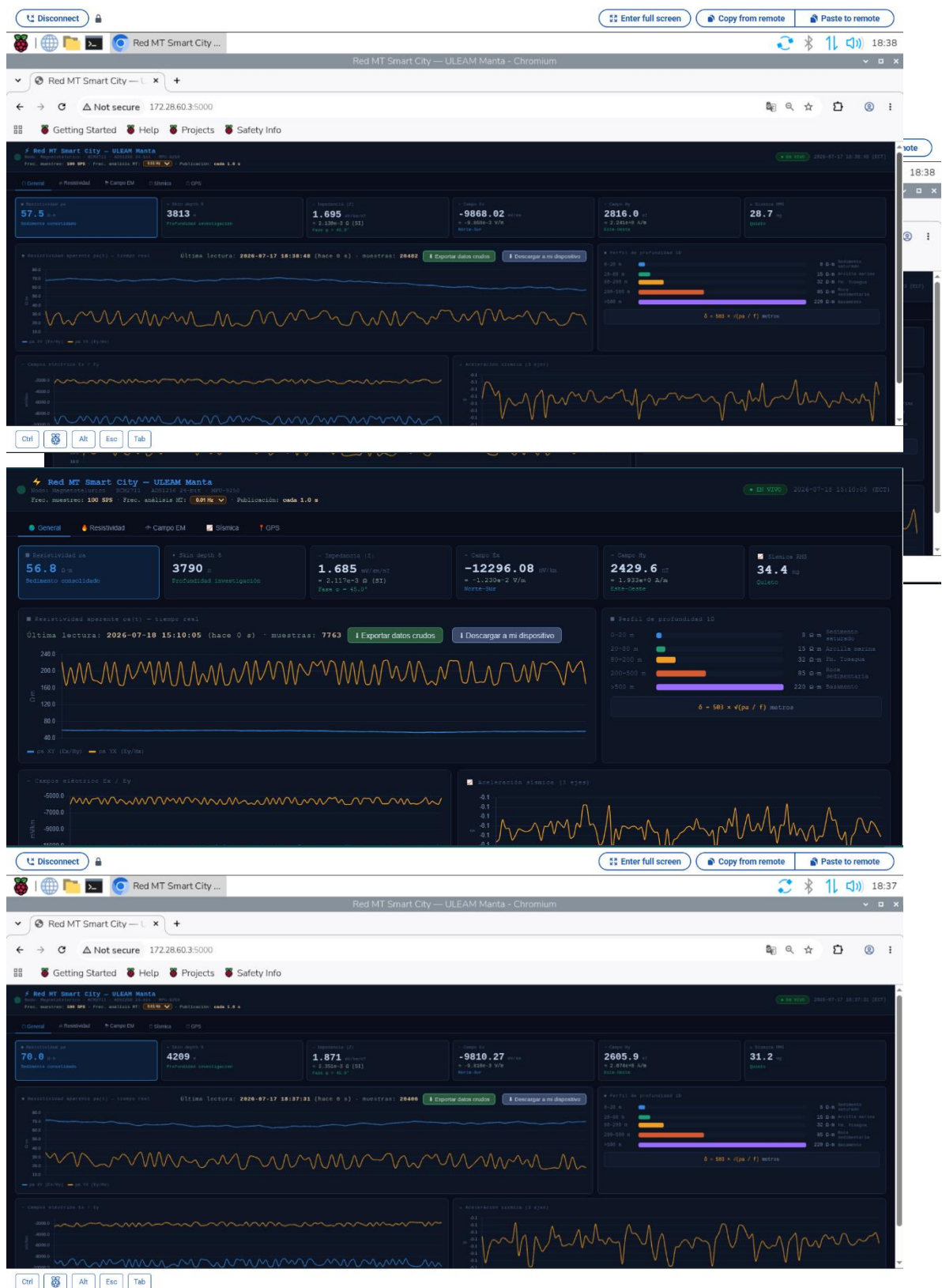




Recolección de datos crudos

🔌 Disconnect		🖥 Enter full screen		📄 Copy from remote		📄 Paste to remote							
🍷 🌐 📁 📄 Red MT Smart City ...		📁 Datos_MT_Crudos		📄 ~/Desktop/Datos_M...		🔄 🔌 🗣 18:43							
~/Desktop/Datos_MT_Crudos/datos_crudos.MT_20260717_184147.csv - Mousepad													
File Edit Search View Document Help													
Fecha/Hora (UTC),Fecha/Hora (ECT),Ex (mV/km),Ex (V/m),Ey (mV/km),Ey (V/m),Hx (nT),Hx (A/m),Hy (nT),Hy (A/m),Impedancia Z (mV/km/nT),Impedancia Z (Ohm SI),Rho_xy (Ohm.m)													
2026-07-14	12:48:15, 2026-07-14	07:48:15, 486.92, 4.8692e-04, -423.31, -4.2331e-04, -21350.49, -1.6990e+01, -12799.99, -1.0186e+01, 0.0, 0.0000e+00, 0.0, 0.0											
2026-07-14	12:48:16, 2026-07-14	07:48:16, 484.61, 4.8461e-04, -449.14, -4.4914e-04, -21359.82, -1.6990e+01, -12894.5, -1.0261e+01, 0.0, 0.0000e+00, 0.0, 0.0											
2026-07-14	12:48:17, 2026-07-14	07:48:17, 441.59, 4.4159e-04, -426.6, -4.2660e-04, -21352.76, -1.6992e+01, -12738.13, -1.0137e+01, 2.0493, 2.5752e-03, 83.991, 995909.111											
2026-07-14	12:48:18, 2026-07-14	07:48:18, 430.81, 4.3081e-04, -428.48, -4.2848e-04, -21350.54, -1.6990e+01, -12591.89, -1.0020e+01, 1.8036, 2.2665e-03, 65.06, 1128523.209											
2026-07-14	12:48:19, 2026-07-14	07:48:19, 444.74, 4.4474e-04, -428.5, -4.2850e-04, -21352.79, -1.6992e+01, -12850.11, -1.0226e+01, 1.7795, 2.2362e-03, 63.334, 1399374.352											
2026-07-14	12:48:20, 2026-07-14	07:48:20, 480.37, 4.8037e-04, -416.42, -4.1642e-04, -21351.97, -1.6991e+01, -12694.46, -1.0182e+01, 1.6695, 2.8980e-03, 55.746, 1583149.857											
2026-07-14	12:48:22, 2026-07-14	07:48:22, 489.7, 4.8970e-04, -421.78, -4.2178e-04, -21350.74, -1.6990e+01, -12583.1, -1.0013e+01, 1.5272, 1.9191e-03, 46.646, 1302167.214											
2026-07-14	12:48:23, 2026-07-14	07:48:23, 399.18, 3.9918e-04, -421.96, -4.2196e-04, -21350.23, -1.6990e+01, -12570.88, -1.0004e+01, 1.5411, 1.9365e-03, 47.497, 1286196.723											
2026-07-14	12:48:24, 2026-07-14	07:48:24, 411.87, 4.1187e-04, -449.28, -4.4928e-04, -21350.29, -1.6990e+01, -12749.84, -1.0146e+01, 1.5415, 1.9372e-03, 47.527, 1342157.291											
2026-07-14	12:48:25, 2026-07-14	07:48:25, 399.72, 3.9972e-04, -435.57, -4.3557e-04, -21352.64, -1.6992e+01, -13417.7, -1.0677e+01, 1.423, 1.7882e-03, 40.499, 1381361.904											
2026-07-14	12:48:26, 2026-07-14	07:48:26, 436.77, 4.3677e-04, -424.65, -4.2465e-04, -21351.98, -1.6991e+01, -12714.83, -1.0118e+01, 1.3771, 1.7305e-03, 37.928, 1352612.743											
2026-07-14	12:48:27, 2026-07-14	07:48:27, 428.06, 4.2806e-04, -423.39, -4.2339e-04, -21351.11, -1.6991e+01, -12634.17, -1.0054e+01, 1.3499, 1.6963e-03, 36.443, 1419766.568											
2026-07-14	12:48:28, 2026-07-14	07:48:28, 418.42, 4.1842e-04, -419.35, -4.1935e-04, -21351.01, -1.6991e+01, -12621.23, -1.0044e+01, 1.3075, 1.6430e-03, 34.191, 1364479.748											
2026-07-14	12:48:29, 2026-07-14	07:48:29, 410.29, 4.1029e-04, -435.12, -4.3512e-04, -21350.35, -1.6990e+01, -12558.03, -9.9934e+00, 1.2642, 1.5886e-03, 31.962, 1389622.84											
2026-07-14	12:48:30, 2026-07-14	07:48:30, 421.5, 4.2150e-04, -451.39, -4.5139e-04, -21350.3, -1.6990e+01, -12812.72, -1.0196e+01, 1.382, 1.7367e-03, 38.199, 1521757.959											
2026-07-14	12:48:31, 2026-07-14	07:48:31, 422.13, 4.2213e-04, -416.19, -4.1619e-04, -21351.55, -1.6991e+01, -12679.44, -1.0090e+01, 1.3311, 1.6727e-03, 35.434, 1627852.43											
2026-07-14	12:48:32, 2026-07-14	07:48:32, 389.7, 3.8970e-04, -421.72, -4.2172e-04, -21350.49, -1.6990e+01, -12608.86, -1.0034e+01, 1.3204, 1.6593e-03, 34.87, 1531419.455											
2026-07-14	12:48:33, 2026-07-14	07:48:33, 430.52, 4.3052e-04, -437.02, -4.3702e-04, -21349.46, -1.6989e+01, -12568.76, -1.0002e+01, 1.3202, 1.6590e-03, 34.859, 1389576.319											
2026-07-14	12:48:34, 2026-07-14	07:48:34, 429.57, 4.2957e-04, -453.31, -4.5331e-04, -21348.06, -1.6988e+01, -12694.67, -1.0182e+01, 1.319, 1.6574e-03, 34.793, 1258553.636											
2026-07-14	12:48:35, 2026-07-14	07:48:35, 329.97, 3.2997e-04, -428.66, -4.2866e-04, -21348.12, -1.6988e+01, -12878.25, -1.0248e+01, 1.4635, 1.8391e-03, 42.837, 963183.322											
2026-07-14	12:48:36, 2026-07-14	07:48:36, 425.48, 4.2548e-04, -461.8, -4.6180e-04, -21356.49, -1.6995e+01, -13161.28, -1.0473e+01, 1.4464, 1.8176e-03, 41.841, 753168.286											
2026-07-14	12:48:37, 2026-07-14	07:48:37, 413.14, 4.1314e-04, -452.66, -4.5266e-04, -21356.39, -1.6995e+01, -12836.61, -1.0215e+01, 1.4352, 1.8035e-03, 41.195, 516944.642											
2026-07-14	12:48:38, 2026-07-14	07:48:38, 411.8, 4.1180e-04, -455.03, -4.5503e-04, -21353.86, -1.6993e+01, -12974.12, -1.0324e+01, 1.409, 1.7785e-03, 39.703, 477683.314											
2026-07-14	12:48:39, 2026-07-14	07:48:39, 411.39, 4.1139e-04, -443.98, -4.4398e-04, -21351.58, -1.6991e+01, -13458.54, -1.0710e+01, 1.4138, 1.7766e-03, 39.976, 491524.773											
2026-07-14	12:48:41, 2026-07-14	07:48:41, 424.46, 4.2446e-04, -458.94, -4.5894e-04, -21351.83, -1.6991e+01, -12992.1, -1.0339e+01, 1.4396, 1.8090e-03, 41.448, 562655.475											
2026-07-14	12:48:42, 2026-07-14	07:48:42, 404.43, 4.0443e-04, -450.69, -4.5069e-04, -21352.28, -1.6992e+01, -13023.19, -1.0364e+01, 1.4181, 1.7821e-03, 40.221, 516072.99											
2026-07-14	12:48:43, 2026-07-14	07:48:43, 385.24, 3.8524e-04, -418.75, -4.1875e-04, -21351.85, -1.6991e+01, -13459.02, -1.0710e+01, 1.4634, 1.8389e-03, 42.829, 557656.265											
2026-07-14	12:48:44, 2026-07-14	07:48:44, 431.4, 4.3140e-04, -435.15, -4.3515e-04, -21348.08, -1.6989e+01, -12571.09, -1.0094e+01, 1.4011, 1.8360e-03, 42.694, 541637.457											
2026-07-14	12:48:45, 2026-07-14	07:48:45, 425.09, 4.2509e-04, -455.68, -4.5568e-04, -21352.0, -1.6991e+01, -12748.86, -1.0145e+01, 1.46, 1.8347e-03, 42.63, 551906.11											
2026-07-14	12:48:46, 2026-07-14	07:48:46, 427.12, 4.2712e-04, -461.35, -4.6135e-04, -21352.75, -1.6992e+01, -13109.58, -1.0425e+01, 1.4695, 1.8467e-03, 43.191, 562525.493											
2026-07-14	12:48:47, 2026-07-14	07:48:47, 427.41, 4.2741e-04, -461.73, -4.6173e-04, -21353.27, -1.6992e+01, -13283.86, -1.0571e+01, 1.4515, 1.8240e-03, 42.135, 577743.521											
Ctrl ⌘ Alt Esc Tab													
2026-07-14	12:48:47, 2026-07-14	07:48:47, 427.41, 4.2741e-04, -461.73, -4.6173e-04, -21353.27, -1.6992e+01, -13283.86, -1.0571e+01, 1.4515, 1.8240e-03, 42.135, 577743.521											
2026-07-14	12:48:48, 2026-07-14	07:48:48, 357.24, 3.5724e-04, -435.03, -4.3503e-04, -21353.03, -1.6992e+01, -13425.9, -1.0684e+01, 1.4679, 1.8447e-03, 43.097, 577133.078											
2026-07-14	12:48:49, 2026-07-14	07:48:49, 427.97, 4.2797e-04, -429.12, -4.2912e-04, -21352.82, -1.6992e+01, -13318.87, -1.0599e+01, 1.4495, 1.8214e-03, 42.019, 609648.74											
2026-07-14	12:48:50, 2026-07-14	07:48:50, 450.6, 4.5060e-04, -430.54, -4.3054e-04, -21352.7, -1.6992e+01, -12720.24, -1.0122e+01, 1.4966, 1.8007e-03, 44.798, 622602.621											
2026-07-14	12:48:51, 2026-07-14	07:48:51, 438.24, 4.3824e-04, -429.85, -4.2985e-04, -21350.95, -1.6991e+01, -12565.19, -9.9991e+00, 1.4996, 1.8845e-03, 44.978, 626462.768											
2026-07-14	12:48:52, 2026-07-14	07:48:52, 414.16, 4.1416e-04, -448.19, -4.4819e-04, -21350.98, -1.6991e+01, -12712.48, -1.0116e+01, 1.4895, 1.8717e-03, 44.37, 637581.748											
2026-07-14	12:48:53, 2026-07-14	07:48:53, 385.63, 3.8563e-04, -453.27, -4.5327e-04, -21351.88, -1.6991e+01, -13106.62, -1.0430e+01, 1.5109, 1.8987e-03, 45.657, 668036.958											
2026-07-14	12:48:54, 2026-07-14	07:48:54, 430.63, 4.3063e-04, -431.04, -4.3104e-04, -21351.39, -1.6991e+01, -12579.92, -1.0011e+01, 1.486, 1.8674e-03, 44.165, 664904.968											
2026-07-14	12:48:55, 2026-07-14	07:48:55, 401.12, 4.0112e-04, -427.27, -4.2727e-04, -21351.41, -1.6991e+01, -12575.1, -1.0007e+01, 1.5104, 1.8981e-03, 45.628, 670408.995											
2026-07-14	12:48:56, 2026-07-14	07:48:56, 428.96, 4.2896e-04, -450.0, -4.5000e-04, -21350.74, -1.6990e+01, -12658.36, -1.0073e+01, 1.5063, 1.8929e-03, 45.381, 680387.052											
2026-07-14	12:48:57, 2026-07-14	07:48:57, 424.39, 4.2439e-04, -457.48, -4.5748e-04, -21350.82, -1.6990e+01, -12842.28, -1.0220e+01, 1.5006, 1.8857e-03, 45.035, 695125.452											
2026-07-14	12:48:58, 2026-07-14	07:48:58, 414.66, 4.1466e-04, -457.77, -4.5777e-04, -21352.81, -1.6992e+01, -13316.44, -1.0597e+01, 1.4983, 1.8829e-03, 44.9, 714497.912											
2026-07-14	12:48:59, 2026-07-14	07:48:59, 428.06, 4.2806e-04, -433.4, -4.3340e-04, -21352.88, -1.6992e+01, -13359.08, -1.0631e+01, 1.4963, 1.8803e-03, 44.777, 727049.970											
2026-07-14	12:49:01, 2026-07-14	07:49:01, 395.23, 3.9523e-04, -434.96, -4.3496e-04, -21351.46, -1.6991e+01, -13202.63, -1.0506e+01, 1.4833, 1.8640e-03, 44.004, 741738.153											
2026-07-14	12:49:02, 2026-07-14	07:49:02, 425.67, 4.2567e-04, -460.28, -4.6028e-04, -21349.79, -1.6990e+01, -13390.63, -1.0656e+01, 1.4688, 1.8458e-03, 43.15, 727199.747											
2026-07-14	12:49:03, 2026-07-14	07:49:03, 441.9, 4.4190e-04, -460.75, -4.6075e-04, -21343.95, -1.6985e+01, -13430.32, -1.0688e+01, 1.4587, 1.8330e-03, 42.555, 579277.569											
2026-07-14	12:49:04, 2026-07-14	07:49:04, 445.15, 4.4515e-04, -438.37, -4.3837e-04, -21335.76, -1.6978e+01, -13325.47, -1.0604e+01, 1.4684, 1.8352e-03, 42.657, 259223.583											
2026-07-14	12:49:05, 2026-07-14	07:49:05, 424.13, 4.2413e-04, -423.69, -4.2369e-04, -21448.39, -1.7068e+01, -13226.68, -1.0525e+01, 1.4489, 1.8268e-03, 41.989, 17648.742											
2026-07-14	12:49:06, 2026-07-14	07:49:06, 423.15, 4.2315e-04, -441.2, -4.4120e-04, -21333.07, -1.6976e+01, -12592.33, -1.0021e+01, 1.4343, 1.8024e-03, 41.145, 15455.798											
2026-07-14	12:49:07, 2026-07-14	07:49:07, 390.21, 3.9021e-04, -431.96, -4.3196e-04, -21321.82, -1.6967e+01, -13362.81, -1.0634e+01, 1.4282, 1.7947e-03, 40.796, 14087.645											
2026-07-14	12:49:08, 2026-07-14	07:49:08, 424.86, 4.2486e-04, -394.24, -3.9424e-04, -21341.4, -1.6983e+01, -13015.52, -1.0357e+01, 1.4166, 1.7801e-03, 40.134, 13827.709											
2026-07-14	12:49:09, 2026-07-14	07:49:09, 411.31, 4.1131e-04, -442.33, -4.4233e-04, -21357.84, -1.6996e+01, -12770.56, -1.0162e+01, 1.4092, 1.7709e-03, 39.718, 14004.935											
2026-07-14	12:49:10, 2026-07-14	07:49:10, 427.84, 4.2784e-04, -461.79, -4.6179e-04, -21358.68, -1.6997e+01, -13232.05, -1.0530e+01, 1.4939, 1.7529e-03, 39.36, 14237.399											
2026-07-14	12:49:11, 2026-07-14	07:49:11, 413.85, 4.1385e-04, -442.39, -4.4239e-04, -21349.69, -1.6990e+01, -13429.76, -1.0687e+01, 1.3869, 1.7470e-03, 38.472, 1431.842											
2026-07-14	12:49:12, 2026-07-14	07:49:12, 361.57, 3.6157e-04, -409.85, -4.0985e-04, -21346.07, -1.6987e+01, -13370.61, -1.0640e+01, 1.3989, 1.7580e-03, 39.141, 14907.346											
2026-07-14	12:49:13, 2026-07-14	07:49:13, 422.42, 4.2242e-04, -440.52, -4.4052e-04, -21334.25, -1.6977e+01, -13375.53, -1.0721e+01, 1.3858, 1.7414e-03, 38.407, 14748.749											
2026-07-14	12:49:14, 2026-07-14	07:49:14, 414.85, 4.1485e-04, -416.88, -4.1688e-04, -21330.81, -1.6975e+01, -13129.21, -1.0448e+01, 1.3796, 1.7374e-03, 38.067, 14422.799											
2026-07-14	12:49:15, 2026-07-14	07:49:15, 436.71, 4.3671e-04, -424.27, -4.2427e-04, -21337.27, -1.6980e+01, -12835.22, -1.0214e+01, 1.3722, 1.7424e-03, 37.66, 13968.608											

Capturas de Grafana y Raspberry Pi Connect.



Códigos de Python

```
"""
magnetotellurico.py
Script principal — Orquestador del Sistema Magnetotelúrico Smart City ULEAM
Captura MT (Ex, Ey) + GPS + IMU y publica en MQTT / InfluxDB

Ejecución:
python3 magnetotellurico.py

Automático (systemd):
sudo systemctl start mt-sistema
sudo journalctl -u mt-sistema -f

Actualizado: Junio 2026
"""

import time
import logging
import sys
import json
from datetime import datetime
import numpy as np
from threading import Thread, Lock
import paho.mqtt.client as mqtt
from influxdb_client import InfluxDBClient
from influxdb_client.client.write_api import SYNCHRONOUS

# Importar configuración y drivers
from config import (
    INFLUX_URL, INFLUX_TOKEN, INFLUX_ORG, INFLUX_BUCKET,
    MQTT_BROKER, MQTT_PORT, MQTT_TOPIC_MT, MQTT_TOPIC_GPS, MQTT_TOPIC_IMU,
    ADS1256_SAMPLE_RATE, PUBLISH_INTERVAL, ELECTRODE_CONFIG,
    MU_0, CAGNIARD_FREQUENCY_HZ, SITE_NAME, SITE_LATITUDE, SITE_LONGITUDE,
    LOG_LEVEL, LOG_FILE, DEBUG_MODE, ENABLE_MPU, MQTT_TOPIC_STATUS,
    FLUXGATE_SCALING_MV_PER_UT, DIPOLO_EX_M, DIPOLO_EY_M, validate_config
)

from ads1256_driver import ADS1256
from mpu9250_driver import MPU9250
from gps_reader import GPSReader, PPS_Sync

#
=====
# LOGGING
#
=====
logging.basicConfig(
    level=getattr(logging, LOG_LEVEL),
```

```

format='%(%asctime)s [%(levelname)s] %(message)s',
handlers=[
    logging.FileHandler(LOG_FILE),
    logging.StreamHandler(sys.stdout)
]
)
logger = logging.getLogger(__name__)

class MagnetotelluricoSystem:
    """Sistema principal de captura y procesamiento MT"""

    def __init__(self):
        logger.info("Iniciando Sistema Magnetotelúrico...")

        # Validar configuración
        errors = validate_config()
        if errors:
            for error in errors:
                logger.warning(error)

        # Inicializar hardware
        try:
            self.adc = ADS1256()
            logger.info("✓ ADS1256 (ADC) inicializado")
        except Exception as e:
            logger.error(f"✗ Error inicializando ADS1256: {e}")
            self.adc = None

        self.mpu = None
        self.imu_fallos = 0
        if ENABLE_MPU:
            try:
                self.mpu = MPU9250()
                logger.info("✓ MPU-9250 (IMU) inicializado")
            except Exception as e:
                logger.warning(f"⚠ MPU-9250 no responde en I²C 0x68: {e}")
                logger.warning("⚠ El sistema CONTINÚA sin datos inerciales (sísmica/orientación). "
                               "Revisar cableado: VCC→3.3V (pin 1), GND→pin 9, SDA→pin 3, SCL→pin 5, "
                               "AD0→GND.")
            else:
                logger.info("MPU-9250 desactivado en config.py (ENABLE_MPU=False)")

        try:
            self.gps = GPSReader()
            logger.info("✓ GPS inicializado")
        except Exception as e:
            logger.error(f"✗ Error inicializando GPS: {e}")
            self.gps = None

```

```

# Inicializar MQTT
try:
    self.mqtt_client = mqtt.Client(mqtt.CallbackAPIVersion.VERSION1)
    self.mqtt_client.on_connect = self._on_mqtt_connect
    self.mqtt_client.on_disconnect = self._on_mqtt_disconnect
    self.mqtt_client.connect(MQTT_BROKER, MQTT_PORT, keepalive=60)
    self.mqtt_client.loop_start()
    logger.info("✓ MQTT inicializado")
except Exception as e:
    logger.error(f"✗ Error conectando MQTT: {e}")
    self.mqtt_client = None

# Inicializar InfluxDB
try:
    self.influx_client = InfluxDBClient(url=INFLUX_URL, token=INFLUX_TOKEN,
org=INFLUX_ORG)
    self.write_api = self.influx_client.write_api(write_type=SYNCHRONOUS)
    logger.info("✓ InfluxDB inicializado")
except Exception as e:
    logger.error(f"✗ Error conectando InfluxDB: {e}")
    self.influx_client = None

# Buffer de datos
self.data_buffer = []
self.buffer_lock = Lock()
self.running = True

def _on_mqtt_connect(self, client, userdata, flags, rc):
    logger.info(f"MQTT conectado con código: {rc}")

def _on_mqtt_disconnect(self, client, userdata, rc):
    if rc != 0:
        logger.warning(f"MQTT desconexión inesperada: {rc}")

def read_mt_data(self):
    """Leer los cuatro canales MT del ADS1256: Ex, Ey (electrodos) y Hx, Hy (fluxgate)"""
    if not self.adc:
        return None

    try:
        ex = self.adc.read_ex() # mV (dipolo Ex)
        ey = self.adc.read_ey() # mV (dipolo Ey)

        # Fluxgate Mag649FL: mV → nT según el factor de escala del modelo
        # (p. ej. 30 mV/μT en la versión ±100 μT → nT = mV/30 × 1000)
        hx_nT = self.adc.read_hx() / FLUXGATE_SCALING_MV_PER_UT * 1000.0
        hy_nT = self.adc.read_hy() / FLUXGATE_SCALING_MV_PER_UT * 1000.0

```

```

        return {
            'timestamp': datetime.utcnow().isoformat(),
            'Ex': ex,
            'Ey': ey,
            'Hx_nT': hx_nT,
            'Hy_nT': hy_nT,
        }
    except Exception as e:
        logger.error(f"Error leyendo MT: {e}")
        return None

def read_gps_data(self):
    """Leer datos GPS"""
    if not self.gps:
        return None

    try:
        location = self.gps.get_location()
        if location:
            return {
                'timestamp': location['timestamp'],
                'latitude': location['lat'],
                'longitude': location['lon'],
                'altitude': location['alt'],
            }
    except Exception as e:
        logger.error(f"Error leyendo GPS: {e}")

    return None

def read_imu_data(self):
    """Leer datos IMU (acelerómetro, giroscopio)"""
    if not self.mpu:
        return None

    try:
        data = self.mpu.read_all()
        self.imu_fallos = 0
        return {
            'timestamp': datetime.utcnow().isoformat(),
            'accel_x': data['accel_x'],
            'accel_y': data['accel_y'],
            'accel_z': data['accel_z'],
            'gyro_x': data['gyro_x'],
            'gyro_y': data['gyro_y'],
            'gyro_z': data['gyro_z'],
            'temp': data['temp'],
        }
    
```

```

    }
except Exception as e:
    self.imu_fallos += 1
    if self.imu_fallos >= 5:
        logger.warning("⚠ El MPU-9250 dejó de responder durante la operación. "
                        "El sistema CONTINÚA sin datos inerciales — revisar el módulo cuando sea posible.")
        self.mpu = None
    else:
        logger.debug(f"Lectura IMU fallida ({self.imu_fallos}/5): {e}")
    return None

def calculate_apparent_resistivity(self, e_mv, dipolo_m, b_nT, freq_hz):
    """
    Resistividad aparente con la fórmula práctica de Cagniard (1953):
     $\rho_a = 0.2 / f \cdot |E/B|^2 \quad [\Omega \cdot m]$ 
    con E en mV/km y B en nT (equivalente a  $\rho_a = |Z|^2 / (\omega \cdot \mu_0)$  con
     $Z = E/H$  y la conversión  $B \rightarrow H$  mediante  $\mu_0$ ).
    """
    if not b_nT or not freq_hz or not dipolo_m:
        return 0.0
    e_mv_km = e_mv / (dipolo_m / 1000.0)
    return 0.2 / freq_hz * (e_mv_km / b_nT) ** 2

def calculate_impedance(self, ex, ey):
    """
    Calcular impedancia telúrica usando la fórmula de Cagniard (1953)
     $\rho_a = |Z|^2 / (\omega \cdot \mu_0)$ 

    Parámetros:
    ex, ey: componentes del campo eléctrico (mV/m)

    Retorna:
    resistividad aparente ( $\Omega \cdot m$ )
    """
    omega = 2 * np.pi * CAGNIARD_FREQUENCY_HZ

    # Magnitud de impedancia (aproximación de magnitud del campo)
    z_magnitude = np.sqrt(ex**2 + ey**2)

    # Resistividad aparente
    if omega == 0 or z_magnitude == 0:
        return 0

    rho_a = (z_magnitude**2) / (omega * MU_0)
    return rho_a

def publish_mt_to_mqtt(self, data):
    """Publicar datos MT a MQTT"""

```

```

if not self.mqtt_client:
    return

try:
    payload = json.dumps({
        'timestamp': data['timestamp'],
        'Ex_mV': data['Ex'],
        'Ey_mV': data['Ey'],
        'Hx_nT': data.get('Hx_nT', 0.0),
        'Hy_nT': data.get('Hy_nT', 0.0),
        'impedance_ohm': self.calculate_impedance(data['Ex'], data['Ey']),
        'rho_xy': self.calculate_apparent_resistivity(
            data['Ex'], DIPOLO_EX_M, data.get('Hy_nT'), CAGNIARD_FREQUENCY_HZ),
        'rho_yx': self.calculate_apparent_resistivity(
            data['Ey'], DIPOLO_EY_M, data.get('Hx_nT'), CAGNIARD_FREQUENCY_HZ),
        'site': SITE_NAME,
    })
    self.mqtt_client.publish(MQTT_TOPIC_MT, payload)
except Exception as e:
    logger.error(f"Error publicando MT a MQTT: {e}")

def publish_aux_to_mqtt(self, gps_data, imu_data):
    """Publicar GPS, IMU y estado de salud del hardware a MQTT (para el dashboard)"""
    if not self.mqtt_client:
        return
    try:
        if gps_data:
            self.mqtt_client.publish(MQTT_TOPIC_GPS, json.dumps({
                'latitude': gps_data['latitude'],
                'longitude': gps_data['longitude'],
                'altitude': gps_data['altitude'],
                'fix': True,
            }))
        if imu_data:
            self.mqtt_client.publish(MQTT_TOPIC_IMU, json.dumps({
                'ax_g': imu_data['accel_x'],
                'ay_g': imu_data['accel_y'],
                'az_g': imu_data['accel_z'],
            }))
        # Estado de salud: el dashboard enciende cada indicador según esto.
        # Si un sensor no responde, su indicador se pone rojo pero la
        # adquisición del resto del sistema NUNCA se detiene.
        self.mqtt_client.publish(MQTT_TOPIC_STATUS, json.dumps({
            'adc_ok': self.adc is not None,
            'mpu_ok': self.mpu is not None,
            'gps_ok': self.gps is not None and gps_data is not None,
            'site': SITE_NAME,
        }))

```

```

except Exception as e:
    logger.error(f"Error publicando auxiliares a MQTT: {e}")

def publish_to_influxdb(self, mt_data, gps_data, imu_data):
    """Escribir datos a InfluxDB"""
    if not self.influx_client:
        return

    try:
        points = []
        timestamp = datetime.utcnow()

        # Punto MT
        if mt_data:
            points.append({
                'measurement': 'magnetotelurico',
                'tags': {'site': SITE_NAME, 'type': 'MT'},
                'fields': {
                    'Ex_mV': mt_data['Ex'],
                    'Ey_mV': mt_data['Ey'],
                    'Hx_nT': mt_data.get('Hx_nT', 0.0),
                    'Hy_nT': mt_data.get('Hy_nT', 0.0),
                    'impedance_Zm': self.calculate_impedance(mt_data['Ex'], mt_data['Ey']),
                    'rho_xy': self.calculate_apparent_resistivity(
                        mt_data['Ex'], DIPOLO_EX_M, mt_data.get('Hy_nT'),
                        CAGNIARD_FREQUENCY_HZ),
                },
                'time': timestamp,
            })

        # Punto GPS
        if gps_data:
            points.append({
                'measurement': 'gps',
                'tags': {'site': SITE_NAME, 'type': 'GPS'},
                'fields': {
                    'latitude': gps_data['latitude'],
                    'longitude': gps_data['longitude'],
                    'altitude_m': gps_data['altitude'],
                },
                'time': timestamp,
            })

        # Punto IMU
        if imu_data:
            points.append({
                'measurement': 'imu',
                'tags': {'site': SITE_NAME, 'type': 'IMU'},
            })

```

```

        'fields': {
            'accel_x': imu_data['accel_x'],
            'accel_y': imu_data['accel_y'],
            'accel_z': imu_data['accel_z'],
            'gyro_x': imu_data['gyro_x'],
            'gyro_y': imu_data['gyro_y'],
            'gyro_z': imu_data['gyro_z'],
            'temp_C': imu_data['temp'],
        },
        'time': timestamp,
    })

    if points:
        self.write_api.write(bucket=INFLUX_BUCKET, record=points)
        logger.debug(f"Escribimos {len(points)} puntos a InfluxDB")

    except Exception as e:
        logger.error(f"Error escribiendo a InfluxDB: {e}")

def run(self):
    """Loop principal de captura y procesamiento"""
    logger.info("Sistema Magnetotelúrico iniciando...")

    try:
        while self.running:
            # Leer sensores
            mt_data = self.read_mt_data()
            gps_data = self.read_gps_data()
            imu_data = self.read_imu_data()

            # Procesar y publicar
            if mt_data:
                self.publish_mt_to_mqtt(mt_data)
                logger.info(f"MT → Ex: {mt_data['Ex']:.2f} mV, Ey: {mt_data['Ey']:.2f} mV")

            # Publicar auxiliares y escribir a InfluxDB cada PUBLISH_INTERVAL segundos
            ahora = time.time()
            if ahora - getattr(self, '_ultima_publicacion', 0) >= PUBLISH_INTERVAL:
                self._ultima_publicacion = ahora
                self.publish_aux_to_mqtt(gps_data, imu_data)
                self.publish_to_influxdb(mt_data, gps_data, imu_data)

            time.sleep(1.0 / ADS1256_SAMPLE_RATE)

    except KeyboardInterrupt:
        logger.info("Detenido por usuario")
    except Exception as e:
        logger.error(f"Error en loop principal: {e}")

```

```

        finally:
            self.cleanup()

    def cleanup(self):
        """Limpiar recursos"""
        logger.info("Limpiando recursos...")
        self.running = False

        if self.adc:
            self.adc.cleanup()
        if self.mpu:
            self.mpu.cleanup()
        if self.gps:
            self.gps.cleanup()
        if self.mqtt_client:
            self.mqtt_client.loop_stop()
        if self.influx_client:
            self.influx_client.close()

        logger.info("Sistema detenido.")

def main():
    """Punto de entrada principal"""
    system = MagnetotelluricoSystem()
    system.run()

if __name__ == "__main__":
    main()

```

Manuales y procedimientos de instalación



Checklist Maestro del Proyecto

Red Inteligente de Análisis Magnetoteléurico · ULEAM · Manta 2026 — Todo lo que hay que hacer, de inicio a fin

Progreso total

0%

0 de 32 tareas completadas

Reiniciar checklist

1

Conectar el hardware (Pi APAGADA)

Hardware

0/5 ▼

Conectar los módulos siguiendo la guía gráfica: 01_INSTALADOR/GUIA_CONEXIONES.html (pin por pin).

☐

Leer la GUIA_CONEXIONES.html completa antes de tocar nada

☐

Montar/conectar la placa Waveshare ADS1256 (HAT o jumpers según la guía) **CRÍTICO**

☐

Conectar el GPS (ojo: TX del GPS va a RX de la Pi, cruzado) **CRÍTICO**

☐

Conectar el MPU-9250 a 3.3V — NUNCA a 5V (VCC→pin 1, GND→pin 9, SDA→pin 3, SCL→pin 5, ADO→GND) **CRÍTICO**

☐

Antena del GPS con vista al cielo

2

Instalar TODO (un solo paso)

Instalador

0/5 ▼

El instalador hace TODO automáticamente en 9 pasos: hardware, Mosquitto + InfluxDB + Grafana + gpsd, código, token, DASHBOARD IoT, panel de Grafana y publicación del tablero en internet mediante túnel seguro. Guía detallada: PASO_A_PASO_INSTALACION.html.

☐

Copiar la carpeta 01_INSTALADOR completa al Escritorio de la Raspberry

☐

Abrir la Terminal y entrar a la carpeta
`cd "$(find ~ -type d -name 01_INSTALADOR | head -1)"`

☐

Ejecutar el instalador (hace los 9 pasos solo, 15-25 min) **CRÍTICO**
`sudo bash INSTALAR_TODO.sh`

☐

Anotar la dirección de internet que muestra al final (<https://...trycloudflare.com>)

☐

Al final responder 's' para reiniciar **CRÍTICO**

3 Verificar que todo funciona Verificación

0/6 ▼

Después del reinicio, comprobar en 2 minutos que el sistema quedó vivo.

- ☐ Arrancar el sistema
`sudo systemctl start mt-sistema`
- ☐ Ver lecturas en vivo (salir con Ctrl+C)
`sudo journalctl -u mt-sistema -f`
- ☐ Anotar la IP de la Pi
`hostname -I`
- ☐ Abrir el DASHBOARD IoT: <http://IP:5000> (la página bonita)
- ☐ Abrir Grafana: <http://IP:3000> (admin/admin)
- ☐ Verificación completa opcional
`bash VERIFICAR_SERVICIOS.sh`

4 Internet: publicación web activa Internet

0/4 ▼

El instalador ya publicó el dashboard en internet mediante el túnel seguro de Cloudflare. Solo verifica.

- ☐ Abrir la dirección <https://...trycloudflare.com> desde el celular con datos (fuera del WiFi)
- ☐ Saber que la dirección CAMBIA cuando la Pi se reinicia — verla de nuevo:
`sudo bash ACCESO_WEB.sh url`
- ☐ (Opcional futuro) Dirección fija con dominio propio: ver GUIA_SERVIDOR.html
- ☐ Si está en la red de ULEAM: solicitar a TI IP fija por MAC + salida HTTPS 443 (texto en la guía)

5 Instalar los electrodos en el campo Campo

0/5 ▼

Guías: 03_GUIAS_CAMPO/PREPARACION_SUELO_ELECTRODOS_MT.html + croquis en GUIA_CONEXIONES.html.

- ☐ Preparar solución iónica (NaCl + CuSO4 + agua)
- ☐ Plantar 4 electrodos en cruz: Ex exacto N-S, Ey exacto E-O CRÍTICO
- ☐ Resistencia de contacto < 5 kOhm por par (multímetro) CRÍTICO
- ☐ Cables blindados a AIN0-AIN3, mallas a AGND solo del lado de la consola
- ☐ Registrar coordenadas GPS de cada electrodo