



Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica



Tesis

**Automatización en Python del procesamiento de datos de piezómetros
para convertir unidades brutas a unidades de ingeniería en el reservorio
Shapiringo - Áncash**

para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

presentado por:

Bach. Joel, Chapoñan Acosta

Bach. Edin Gean Carlos, Vásquez Sempértegui

Asesor:

MSc. Ing. Segundo Francisco Segura

Altamirano

Lambayeque-Perú

2026

Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Automatización en Python del procesamiento de datos de
piezómetros para convertir unidades brutas a unidades de
ingeniería en el reservorio Shapiringo - Áncash**

Autores:

Bach. Joel, Chapoñan Acosta



Bach. Edin Gean Carlos, Vásquez Sempértegui



Asesor:

MSc. Ing. Segundo Francisco Segura
Altamirano



LAMBAYEQUE - PERÚ

2026

**Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica**

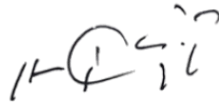
**Automatización en Python del procesamiento de datos de piezómetros
para convertir unidades brutas a unidades de ingeniería en el reservorio
Shapiringo - Áncash**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

Sustentado y aprobado ante los siguientes miembros del jurado:



LUCÍA ISABEL CHAMÁN CABRERA
Presidente



HUGO JAVIER CHICLAYO PADILLA
Secretario



THAUSO GAD PACHAMANGO BAUTISTA
Vocal

Lambayeque-Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
 FACULTAD DE CIENCIAS FISICAS Y MATEMATICAS
 DECANATO

Ciudad Universitaria - Lambayeque

LICENCIADA - RESOLUCION DEL CONSEJO DIRECTIVO N° 015 -2023-SUNEDU / CD



0079



ACTA DE SUSTENTACION N° 43.-2026.-D/FACFyM

Siendo las 11:00 a.m del día 07 de mayo del 2026, se reunieron los miembros del jurado evaluador de la Tesis titulada:

Automatización en Python del procesamiento de datos de pierómetros para convertir unidades baricas a unidades de Ingeniería en el reservorio Shapirungo - Aucash

Designados por Resolución N° 1131 - 2025 D/FACFyM de fecha 20 de noviembre 2025

Con la finalidad de evaluar y calificar la sustentación de la tesis antes mencionada, conformada por los siguientes docentes:

- | | |
|--|------------|
| <u>Dra. Lucia Isabel Chaman Cabers</u> | Presidente |
| <u>M.Sc. Hugo Javier Chacayo Padilla</u> | Secretario |
| <u>Mg. Thairo God Pachamayo Bautista</u> | Vocal |

La tesis fue asesorada por (el) (la) M.Sc. Segundo Francisco Segura Altamirano, nombrado por Resolución N° 1131 - 2025 D/FACFyM de fecha 20 de noviembre 2025

El Acto de Sustentación fue autorizado por Resolución N° 334 - 2026 D/FACFyM de fecha 27 de abril del 2026

La Tesis fue presentada y sustentada por (el) (los) Bachiller (es): Chapouan Pcosia, Joel y Vasquez Sempértegui Edin Gean Carlos y tuvo una duración de 30 minutos.

Después de la sustentación, y absueltas las preguntas y observaciones de los miembros del jurado se procedió a la calificación respectiva, otorgándole el Calificativo de diecisiete (17) en la escala vigesimal, mención (Bueno).

Por lo que queda(n) apto(s) para obtener el Título Profesional de Ingeniería Eléctrica de acuerdo con la Ley Universitaria 30220 y la normatividad vigente de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas y la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo.

Siendo las 12:00 m se dio por concluido el presente acto académico, dándose conformidad al presente acto con la firma de los miembros del jurado.

Lucia Isabel Chaman Cabers
 LUCIA ISABEL CHAMAN CABERS

Presidente

M.Sc. Ing. Hugo Javier Chacayo Padilla

Secretario

Thairo God Pachamayo Bautista

Vocal

M.Sc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano
 Asesor

ANEXO 01

CONSTANCIA DE VERIFICACIÓN DE ORIGINALIDAD

Yo, Segundo Francisco Segura Altamirano, usuario revisor del documento titulado “**Automatización en Python del procesamiento de datos de piezómetros para convertir unidades brutas a unidades de ingeniería en el reservorio Shapiringo – Áncash**” presentado por el Bachiller en Ingeniería Electrónica Joel, Chapoñan Acosta y por Bachiller en Ingeniería Electrónica Edin Gean Carlos, Vásquez Sempértegui, Identificado con Documento de Identidad 09922587; declaro que la evaluación realizada por el Programa Informático, ha arrojado un porcentaje de similitud de **06%**, verificable en el Resumen de Reporte automatizado de similitudes que se acompaña.

El suscrito analizó dicho reporte y concluyó que cada una de las coincidencias detectadas dentro del porcentaje de similitud permitido no constituyen plagio y que el documento cumple con la integridad científica y con las normas para el uso de citas y referencias establecidas en los protocolos respectivos.

Se cumple con adjuntar el Recibo Digital a efectos de la trazabilidad respectiva del proceso.

Lambayeque, 03 de marzo de 2026



MSc. Ing Segundo Francisco Segura Altamirano
DNI: 09922587
Asesor

Se adjunta:

*Resumen de Reporte automatizado de similitudes

*Recibo Digital

ORIGINALITY REPORT

6%

SIMILARITY INDEX

6%

INTERNET SOURCES


0%

PUBLICATIONS

2%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repositorio.unprg.edu.pe Internet Source	1%
2	repositorio.uchile.cl Internet Source	1%
 MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano DNI 09922587 Asesor		
3	www.geokon.com Internet Source	<1%
4	dokumen.tips Internet Source	<1%
5	repositorio.unasam.edu.pe Internet Source	<1%
6	hdl.handle.net Internet Source	<1%
7	repositorio.unc.edu.pe Internet Source	<1%
8	Submitted to Instituto Superior de Artes, Ciencias y Comunicación IACC Student Paper	<1%
9	ensesa.com.mx Internet Source	<1%
10	repositorio.upt.edu.pe Internet Source	<1%
11	repositorio.unica.edu.pe Internet Source	<1%
12	www.pinterest.com Internet Source	<1%

13	gemini-e3.epfl.ch Internet Source	<1 %
14	geotecnia-sor.blogspot.com Internet Source	<1 %
15	Submitted to Universidad Europea de Madrid Student Paper	<1 %
16	Submitted to Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo Student Paper	<1 %
17	dl.kotra.or.kr Internet Source	<1 %
18	Submitted to utn Student Paper	<1 %
19	repositorio.uncp.edu.pe Internet Source	<1 %
20	oa.upm.es Internet Source	<1 %
21	repositorio.uwiener.edu.pe Internet Source	<1 %


MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano
DNI 09922587
Asesor

Exclude quotes Off Exclude matches < 15 words
 Exclude bibliography On





Digital Receipt

This receipt acknowledges that Turnitin received your paper. Below you will find the receipt information regarding your submission.

The first page of your submissions is displayed below.

Submission author: Joel/edin Gean Carlos Chapoñan Acosta/vásquez Sempértegui
Assignment title: Quick Submit
Submission title: TF
File name: main.pdf
File size: 9.75M
Page count: 81
Word count: 12,863
Character count: 73,235
Submission date: 03-Mar-2026 06:33PM (UTC-0500)
Submission ID: 2893729849

 **Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo**
Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica 

Tesis

Automatización en Python del procesamiento de datos de piezómetros
para convertir unidades brutas a unidades de ingeniería en el reservorio
Shapiringo - Áncash

para optar el título profesional de Ingeniero Electrónico

presentado por:

Bach. Joel, Chapoñan Acosta
Bach. Edin Gean Carlos, Vásquez Sempértegui

Asesor:
MSc. Ing. Segundo Francisco Segura
Altamirano
Lambayeque-Perú

2026


MSc. Ing. Segundo Francisco Segura Altamirano
DNI 09922587
Asesor

Agradecimientos

Agradezco profundamente a Dios, por guiarme en cada etapa de mi vida y por permitirme culminar esta importante etapa de mi formación profesional.

A mi madre, María Santos, por su amor incondicional, su entrega y su perseverancia, siendo el motor fundamental de mi formación personal y profesional.

A mi papá y hermanos, por estar siempre a mi lado, por su apoyo sincero y por compartir conmigo la alegría de alcanzar este objetivo.

Expreso mi especial agradecimiento a mi asesor por su orientación constante durante el desarrollo de esta investigación.

Expreso mi sincero reconocimiento a mi colega de tesis por su apoyo constante para culminar este trabajo. Asimismo, a mis amigos y colegas, quienes con su ánimo me impulsaron a seguir creciendo en esta etapa profesional.

Gracias por todo.

Bach. Joel, Chapoñan Acosta

Bachiller Ingeniería Electrónica

Lambayeque 2026

Dedicatoria

Dedico este logro académico, a mi madre, María Santos, por ser el pilar fundamental de este logro. Por su energía inagotable, su fortaleza y su fe constante en mí. Nunca permitió que me rindiera y estuvo presente en cada esfuerzo y en cada amanecida. Mujer fuerte, inteligente y perseverante, a quien debo gran parte de este logro.

A mi papá y hermanos, por su apoyo, su compañía y por ser parte fundamental de este camino. Este logro es reflejo del esfuerzo, la constancia y el respaldo familiar que siempre me acompañaron.

Gracias por todo.

Bach. Joel, Chapoñan Acosta
Bachiller Ingeniería Electrónica
Lambayeque 2026

Agradecimientos

En primer lugar a Dios, por haberme guiado y protegido, y por concederme el conocimiento y las oportunidades necesarias para recorrer este largo camino.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi madre, por su apoyo constante y su confianza en mí a lo largo de todo este proceso, especialmente en los momentos de mayor dificultad.

Agradezco de manera especial a mi asesor, por su orientación académica, su exigencia formativa y el tiempo dedicado durante el desarrollo de esta tesis.

Finalmente, agradezco a mis colegas y amigos, quienes me brindaron la oportunidad de aprender de ellos y me animaron a continuar avanzando en este camino profesional.

Gracias por todo.

Bach. Edin Gean Carlos, Vásquez Sempértegui

Bachiller Ingeniería Electrónica

Lambayeque 2026

Dedicatoria

A mi madre, quien siempre creyó en mis capacidades y me sostuvo incluso en los días grises y de frustración. Que celebra mis logros, aunque a veces no los comprenda del todo, y que ante la ausencia demostró valentía y tenacidad, siendo doblemente fuerte cuando fue necesario. Nunca bajó los brazos y continúa enseñándome que rendirse no es una opción, y que aun en la dificultad siempre es posible mantenerse firme y seguir adelante.

Gracias por todo.

Bach. Edin Gean Carlos, Vásquez Sempértegui

Bachiller Ingeniería Electrónica

Lambayeque 2026

Resumen

La presente investigación tiene como objetivo desarrollar una herramienta automatizada en Python para el procesamiento de datos de piezómetros de cuerda vibrante, orientada a la conversión de unidades brutas a unidades de ingeniería y a la optimización de la visualización e interpretación de la información geotécnica del reservorio Shapingo, ubicado en la región Áncash. La metodología se basa en el diseño de un flujo automatizado que integra la carga de archivos CSV generados por la gateway Ackcio, la aplicación de parámetros de calibración e instalación específicos de cada sensor y la conversión de lecturas crudas a variables técnicas como nivel piezométrico, cota piezométrica y temperatura. La herramienta fue implementada en el entorno Google Colab utilizando Python y bibliotecas especializadas para el procesamiento y visualización de datos. Como resultado, se desarrolló un sistema que genera salidas estandarizadas en formato CSV, un dashboard interactivo para el análisis temporal de las variables y reportes técnicos en PDF con información trazable del sensor y un resumen estadístico del periodo analizado. La validación cuantitativa, mediante el coeficiente de correlación de Pearson, evidenció una alta concordancia entre el procesamiento automatizado y el cálculo manual en Excel, mientras que la validación cualitativa mediante juicio de expertos mostró una elevada aceptación de la herramienta, confirmando su viabilidad técnica para el monitoreo piezométrico.

Palabras clave: Piezómetros, procesamiento de datos, Python, automatización, monitoreo geotécnico.

Abstract

This research aims to develop an automated Python-based tool for processing vibrating wire piezometer data, focused on converting raw measurements into engineering units and improving the visualization and interpretation of geotechnical information from the Shapiringo reservoir, located in the Áncash region. The methodology is based on the design of an automated workflow that integrates the loading of CSV files generated by the Ackcio gateway, the application of sensor-specific calibration and installation parameters, and the conversion of raw readings into technical variables such as piezometric level, piezometric elevation, and temperature. The tool was implemented in the Google Colab environment using Python and specialized libraries for data processing and visualization. As a result, a system was developed that generates standardized outputs in CSV format, an interactive dashboard for temporal analysis of the variables, and technical PDF reports containing traceable sensor information and a statistical summary of the analyzed period. Quantitative validation using the Pearson correlation coefficient showed a high level of agreement between the automated processing and manual calculations performed in Excel, while qualitative validation through expert judgment indicated strong acceptance of the tool. These preliminary results confirm the technical feasibility of the proposed automation as support for piezometric monitoring.

Key words: Piezometers, data processing, Python, automation, geotechnical monitoring.

Índice general

Reconocimientos	v
Dedicatoria	vi
Reconocimientos	vii
Dedicatoria	viii
Resumen	ix
Abstract	x
Índice de figuras	xiv
Índice de Tablas	xvi
Introducción	xviii
1. Capítulo I: Marco Teórico	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Antecedentes internacionales	1
1.1.2. Antecedentes nacionales	2
1.1.3. Antecedentes locales	3
1.2. Bases Teóricas	4
1.2.1. Ingeniería Geotécnica	4
1.2.2. Instrumentación Geotécnica	4
1.2.3. Importancia del monitoreo geotécnico	5
1.2.4. Piezómetros de cuerda vibrante GEOKON 4500	6
1.2.5. Unidades brutas y de ingeniería	7
1.2.6. Fórmulas de conversión de piezómetros de cuerda vibrante	8
1.2.7. Procesamiento de Datos con Python	17

1.2.8. Equipos de telemetría y geotecnia	17
2. Capítulo II: Marco Metodológico	20
2.1. Tipo y Enfoque de Investigación	20
2.2. Diseño de Investigación	20
2.3. Contraste de Hipótesis	21
2.4. Población y Muestra	22
2.4.1. Población	22
2.4.2. Muestra	22
2.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos	22
2.5.1. Técnicas empleadas	22
2.5.2. Instrumentos y Herramientas	22
2.5.3. Equipos de medición y adquisición de datos	23
2.6. Análisis y Procesamiento de Datos	25
3. Capítulo III: Resultados	27
3.1. Implementación del sistema automatizado de procesamiento de datos piezométricos	27
3.1.1. Datos de calibración e instalación de los piezómetros	27
3.1.2. Flujo del funcionamiento de la herramienta	28
3.1.2.1. Ingesta y preparación de datos	28
3.1.2.2. Identificación del instrumento y asignación de parámetros	31
3.1.2.3. Conversión a unidades de ingeniería y cálculo de cota .	32
3.2. Visualización, análisis y generación de productos técnicos	34
3.2.1. Herramientas de visualización y análisis	34
3.2.1.1. Matriz de sensores y umbrales de alerta	34
3.2.1.2. Dashboard interactivo	36
3.2.2. Generación de reportes PDF y archivo CSV	40
3.2.2.1. Información del sensor	40

3.2.2.2.	Ubicación del sensor	41
3.2.2.3.	Resumen de datos	42
3.2.2.4.	Gráfico de los datos	43
3.2.2.5.	Archivo CSV procesado por la herramienta	43
3.3.	Aplicación de la herramientas a datos reales del reservorio	43
3.4.	Evaluación del desempeño y validación de la herramienta	46
3.4.1.	Contraste de resultados: Herramienta vs. Excel	46
3.4.2.	Resultados de cuestionario de juicio experto	47
4.	Capítulo IV: Discusión	55
5.	Conclusiones y Recomendaciones	57

Índice de figuras

1.1. Deslizamiento de tierras de la mina de cobre de Bingham Canyon.	6
1.2. Piezómetro de cuerda vibrante Geokon 4500.	7
1.3. Certificado de calibración típico de Piezómetro de Cuerda Vibrante de la marca GEOKON.	14
1.4. Certificado de calibración típico de Piezómetro de Cuerda Vibrante de la marca GEONSENSE.	15
1.5. Certificado de calibración típico de Piezómetro de Cuerda Vibrante de la marca SOIL.	16
1.6. Nodo Ackcio del tipo cuerda vibrante.	18
1.7. Puerta de enlace de Ackcio (Gateway).	19
2.1. Vista general del nodo PE-01 ubicado alrededor del reservorio.	24
2.2. Gateway Ackcio instalada en el reservorio.	25
3.1. Se carga el archivo al entorno de Colab para iniciar con el procesamiento.	29
3.2. Visualización de los datos brutos (sin procesar) del archivo CSV del PE-01 en el entorno de Colab.	30
3.3. CSV retornado después de ejecutar la celda 1, las unidades del PE-01 están en digits y en °C.	30
3.4. Celda 2 con los parámetros de los 11 instrumentos que serán utilizados para la conversión de unidades.	31
3.5. Al completar la ejecución de la celda 3, muestra un mensaje de confirmación.	33
3.6. Visualización de los datos en unidades de ingeniería, listos para graficarlos	33
3.7. Definición de variables de información de cada instrumento utilizada en elaboración del reporte técnico.	35
3.8. Definición de umbrales para alertas de los instrumentos, utilizados también en los reportes.	35

3.9. Vista del dashboard al ejecutar la celda 5, se identifican el TAG del instrumento, el date picker, el resumen de los datos en el periodo establecido, los botones para generar el reporte y descargar los datos procesados en CSV.	37
3.10. Visualización de ‘Nivel piezométrico (mH ₂ O)’.	37
3.11. Visualización de ‘Promedio mensual del nivel (mH ₂ O)’, si elige un periodo que incluye 2 o más meses, caso contrario mostrará un promedio diario.	38
3.12. Visualización ‘Cota piezométrica (msnm)’, se incluye los niveles de alerta sombreados para ubicar el estado de las lecturas registradas.	38
3.13. Visualización ‘Temperatura (°C)’ del instrumento.	39
3.14. Visualización ‘Calidad de señal (%)’ del nodo.	39
3.15. Encabezado del reporte e información de un sensor procesado.	41
3.16. Ubicación geográfica del piezómetro procesado en el reservorio Shapiringo.	42
3.17. Visualización de gráficos del sensor procesado del reporte.	44
3.18. Visualización del archivo CSV del sensor procesado.	45
3.19. Resultados de la cuarta pregunta de la sección 1 del cuestionario, Años de experiencia del evaluador.	49
3.20. Resultados de la quinta pregunta de la sección 1 del cuestionario, Experiencia con piezómetros del evaluador.	49
3.21. Resultados de la quinta pregunta de la sección 1 del cuestionario, Familiaridad con Google Colab del evaluador.	50

Índice de Tablas

1.1. Tabla de Conversión de Unidades de Presión	10
3.1. Parámetros de calibración e instalación utilizados para la conversión de unidades de ingeniería	28
3.2. Resumen de datos del sensor procesado	42
3.3. Resumen de registros crudos y procesados por grupo (PE/PCV)	46
3.4. Resultados de r por grupo, PE y PCV, de las series de datos de mH ₂ O, °C y msnm.	46
3.5. Resultados de r de los 11 instrumentos de las series de datos de mH ₂ O, °C y msnm.	47
3.6. Resultados de la tercera pregunta de la Sección I del cuestionario: Cargo o puesto del evaluador.	48
3.7. Resultados de la Sección II del cuestionario Likert: medias por ítem y promedio global	50

Introducción

El monitoreo geotécnico es un componente fundamental en la evaluación del comportamiento de obras civiles, estructuras hidráulicas y proyectos mineros, ya que permite detectar oportunamente variaciones en las condiciones del subsuelo que podrían afectar la estabilidad y seguridad de una infraestructura. Mediante sistemas de instrumentación especializados se registran parámetros como presión intersticial, desplazamientos y asentamientos, los cuales brindan información clave tanto para el análisis técnico como para la toma de decisiones preventivas.

Dentro de estos sistemas, los piezómetros de cuerda vibrante son ampliamente utilizados para medir presiones de poro y niveles piezométricos. Estos instrumentos generan lecturas en unidades propias del sensor, como frecuencia o resistencia eléctrica, que deben convertirse a unidades de ingeniería para su correcta interpretación. Actualmente, los sistemas de telemetría inalámbrica permiten recolectar grandes volúmenes de datos mediante nodos y gateways que exportan registros en archivos CSV. Sin embargo, disponer de datos no garantiza por sí mismo su utilidad técnica.

La principal dificultad es que los registros descargados corresponden a datos crudos que deben transformarse aplicando ecuaciones del fabricante, parámetros de calibración y referencias de instalación de cada instrumento. Aunque algunas plataformas permiten exportar valores parcialmente procesados, estos pueden generar dudas en los operarios, quienes requieren el dato final validado para su análisis. Además, estas soluciones suelen limitarse a visualizaciones básicas. En muchos casos, el procesamiento adicional se realiza manualmente en hojas de cálculo, lo que implica pasos repetitivos, ajustes por sensor y mayor probabilidad de errores, afectando la eficiencia y confiabilidad del análisis.

En el sistema de monitoreo del reservorio Shapiringo, la información de once piezómetros de cuerda vibrante se descarga periódicamente en archivos CSV con lecturas en unidades brutas. Si bien la gateway y nodos facilitan la adquisición y almacenamiento

de datos, no realiza un procesamiento avanzado orientado a la conversión estandarizada, validación sistemática y generación estructurada de reportes técnicos. Esto evidencia una brecha entre la recolección digital de datos y su transformación en información técnica clara y reproducible para la gestión del monitoreo geotécnico.

Ante esta situación, surge la necesidad de desarrollar una solución que automatice el procesamiento de datos piezométricos, asegurando la correcta aplicación de parámetros de calibración e instalación, reduciendo la intervención manual y fortaleciendo la consistencia del análisis. En el marco de la línea de investigación Ingenierías y Tecnologías, la propuesta integra herramientas de programación e instrumentación geotécnica para mejorar la gestión de datos del monitoreo.

En este contexto, la investigación tuvo como objetivo general desarrollar una herramienta automatizada en Python para procesar datos de piezómetros de cuerda vibrante, convirtiendo de manera confiable las unidades brutas a unidades de ingeniería y optimizando la visualización e interpretación de la información. Como objetivos específicos se planteó diseñar un sistema capaz de importar, limpiar y convertir datos aplicando los parámetros de cada instrumento, desarrollar un entorno de visualización y generación automática de archivos CSV procesados y reportes en PDF, aplicar la herramienta a datos reales del reservorio y validar su precisión mediante comparación con el cálculo manual y evaluación por expertos.

La propuesta no solo busca replicar el procedimiento tradicional de conversión, sino integrarlo en un flujo automatizado y técnicamente trazable que reduzca errores y mejore la eficiencia operativa. De esta manera, se fortalece el carácter preventivo del monitoreo geotécnico y se promueve el uso de herramientas computacionales como apoyo a la ingeniería aplicada.

Capítulo I: Marco Teórico

1.1. Antecedentes

1.1.1. Antecedentes internacionales

- Brandão et al., 2023 investigaron el uso de técnicas de aprendizaje automático para identificar anomalías de datos de piezómetros en una presa de relaves. Su objetivo fue desarrollar un modelo predictivo que ayude a descubrir datos atípicos en extensas series temporales de piezómetros. En este estudio emplearon un conjunto de 160 lecturas de un piezómetro de una presa. La metodología abarcó la calibración de un modelo de “k-nearest-neighbours” (KNN) con el fin de pronosticar la lectura futura a partir de la lectura anterior y el uso del algoritmo “local outlier factor” (LOF) para identificar lecturas anómalas. El KNN con 16 vecinos logró con un RMSE = 0.15m y MAE = 0.10 coeficientes de determinación de 0.91 (prueba) y 0.94 (entrenamiento). Como resultado da que la asociación de KNN-LOF es una herramienta útil para pre-filtrar datos e identificar anomalías y asistir al personal en la detección temprana de problemas en instrumentación geotécnica. Este proyecto ilustra la relevancia de usar algoritmos automáticos para manejar datos de piezómetros, enfoque que el actual trabajo retoma utilizando Python.
- Cerda Salazar, 2022 propuso una metodología avanzada de monitoreo para depósitos de relaves. El estudio fue aplicado, integrando sensores piezométricos y plataformas de transmisión en tiempo real. Concluye que, a lo largo del desarrollo de la investigación, en los sistemas de información aún sigue habiendo depósitos que utilizan herramientas como Excel para el procesamiento y análisis de datos. Esto, indica que una gran debilidad de los sistemas de monitoreo actuales son la falta de plataformas que permitan visualizar e integrar la información de forma compleja, remota y en tiempo real.

- Yogatama y Tirta, 2021 comenta que la revolución industrial 4.0 ha impulsado la digitalización en la ingeniería geotécnica mediante el uso de Python, lenguaje que posibilita la automatización de cálculos, el procesamiento de cantidades masivas de datos y la mejora de análisis en campo y laboratorio. La modelación en 3D, el monitoreo geotécnico automatizado, la interpretación de ensayos CPT/CPTu y los análisis de licuefacción son algunas de sus aplicaciones más notables, las cuales optimizan la exactitud y disminuyen el tiempo requerido para procesar. El autor concluye que, a pesar de que existen limitaciones relacionadas con la capacitación en programación y la estandarización de datos, Python se ha establecido como una herramienta de apoyo que potencia la toma de decisiones técnicas en proyectos más confiables y rentables.

1.1.2. Antecedentes nacionales

- Cabrera y Sanabria, 2015 presentaron la tesis “Instrumentación geotécnica para monitorear el nivel freático y calidad del agua con sensores eléctricos en piezómetros de tubo abierto”. Su objetivo fue proponer un sistema de monitoreo que conserve el ecosistema y los recursos hídricos, a través de la recopilación de datos de niveles freáticos y calidad del agua. Consistió en instalar piezómetros de tubo abierto que incorporan sensores eléctricos y llevar a cabo análisis fisicoquímicos de laboratorio. Los resultados permitieron determinar periodos de ascenso y descenso del nivel freático, así como reconocer posibles focos de contaminación. La conclusión indicó que los piezómetros con sensores eléctricos posibilitan medición exacta de la calidad del agua y el nivel freático, lo cual valida las hipótesis propuestas. Aunque esta tesis no automatizó el procesamiento de datos, pero demuestra lo esencial que es transformar lecturas brutas en información interpretada, lo cual justifica el propósito de la investigación actual.
- García De la Cruz, 2025 comenta que la instalación de piezómetros para la medición de parámetros hidrogeológicos se ha hecho más necesario. Esta investigación fue

científica, de nivel explicativo y de tipo aplicada. Estudió la implementación de piezómetros Casagrande de recursos hídricos en la Unidad Minera Yauricocha para ver cómo influye esto en la planificación de monitoreo y gestión. Consistió en realizar la identificación de los parámetros físicos del agua mediante nueve mediciones, tales como de la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica y los resultados fueron analizados para cada caso. Los resultados mostraron que la correcta instalación de los procedimientos de los piezómetros Casagrande influye significativamente en el mejoramiento de la planificación monitoreo y gestión.

1.1.3. Antecedentes locales

- Cisneros Valencia, 2020 desarrolló la tesis “Investigación geotécnica e instrumentación para el diseño de construcción e instalación de piezómetros y pozos de drenaje en la mina Pierina”. La motivación fue que las aguas subterráneas y superficiales de la mina afectaban su funcionamiento, es por eso que era necesario captarlas y gestionarlas. El estudio tuvo enfoque aplicado con método científico cuantitativo, los datos de laboratorio y campo se analizaron mediante gráficos. Se montaron piezómetros de cuerda vibrante y se implementó un sistema de “Data Logger” para monitoreo automático. Esto posibilitó el reconocimiento de anomalías en los reportes semanales o mensuales y mejorar la respuesta frente a eventos. Se concluyó que la gestión de drenaje en la mina es más sencilla y que optimiza la detección temprana de anomalías cuando se realiza un monitoreo continuo con sensores de cuerda vibrante y dataloggers. Este antecedente demuestra que en Ancash ya se incorporan sensores automáticos, a pesar de que el procesamiento de datos todavía se lleva a cabo de forma manual, esto permite la posibilidad de automatizar la conversión de unidades con Python.

1.2. Bases Teóricas

1.2.1. Ingeniería Geotécnica

Según (Morera de la Vall González, 2016) la ingeniería geotécnica es una rama de la ingeniería civil que analiza cómo se relacionan las obras de infraestructura con el medio geológico. Su aplicación práctica abarca la evaluación, el diseño y la construcción con materiales obtenidos de la tierra, tanto en obras hidráulicas, como represas y embalses; en infraestructuras de transporte, como caminos y túneles, en actividades mineras a cielo abierto y subterráneas, así como también en pendientes, cimientos profundos y edificios.

1.2.2. Instrumentación Geotécnica

Según (Morera de la Vall González, 2016) la instrumentación geotécnica incluye una diversidad extensa de equipos y variantes, lo cual posibilita su uso en diferentes clases de construcciones e infraestructuras. La principal dificultad radica en elegir las herramientas que se ajusten mejor a cada trabajo, con el objetivo de conseguir la máxima cantidad de información sin afectar demasiado los trabajos o la estructura. La selección de dispositivos varía entre proyectos parecidos, debido a que está sujeta a múltiples factores y no se restringe a un solo tipo de trabajo.

Según (Álvarez et al., 2023) la instrumentación geotécnica comprende el uso de sensores y sistemas de adquisición de datos para monitorear las condiciones del subsuelo. Entre los instrumentos más empleados destacan:

- **Piezómetros:** La importancia radica que para el análisis del proceso de consolidación y el cálculo de esfuerzos efectivos, es fundamental medir la presión poro y los niveles de agua a través de piezómetros. Existen diferentes tipos de piezómetros: Casagrande, de tubo abierto, hidráulicos, semiconductores, de cuerda vibrante.
- **Inclinómetros:** Los inclinómetros son herramientas fundamentales para la investigación de deslizamientos y el seguimiento de los movimientos en roca o tierra.
- **Celdas de asentamiento:** Estos dispositivos están compuestos por un sensor de

alambre vibrante que está unido a una placa de asentamiento y a un reservorio en terreno firme, a través de tubos rellenos de líquido.

- **Tiltmeters:** Sensores de inclinación estructural.
- **Acelerógrafos:** Estos instrumentos contienen un acelerómetro y una unidad de grabación digital que producen un acelerograma, el cual muestra el cambio en la aceleración en un lugar específico.
- **Pozómetros y cámaras de pozo:** Para medir la profundidad del nivel de agua en pozos.
- **Extensómetros:** Ellos registran la compresión o expansión entre sensores que están instalados en un pozo a una distancia determinada. Estos equipos permiten la toma de decisiones basada en datos reales, reduciendo la incertidumbre en los modelos geotécnicos.

1.2.3. Importancia del monitoreo geotécnico

Para supervisar tanto el trabajo como el terreno de la cimentación en proyectos de gran escala, por ejemplo, la construcción de presas, (Granados Alegría, 2009) agrega que resulta fundamental incorporar instrumentación estructural y geotécnica apropiada. Esto para posibilitar la detección oportuna de fallas y simplificar la toma de decisiones para conservar la estabilidad de la presa. Aparte de garantizar el funcionamiento adecuado de la estructura, la instrumentación garantiza la seguridad de los trabajadores y futuros usuarios del dique o de sus accesos.

Un caso ejemplar de monitoreo geotécnico ocurrió el 10 de abril de 2013 según (NCYT, 2014), en la mina de cobre Bingham Canyon (en Utah, Estados Unidos) se produjo uno de los mayores deslizamientos no volcánicos jamás registrados, con un volumen aproximado de 165 millones de toneladas. No obstante, los ingenieros no se sorprendieron con este suceso: se detectó previamente gracias a un minucioso monitoreo geotécnico de la pendiente. Se registraron desplazamientos graduales durante varias semanas (de 2 mm diarios al comienzo de febrero de ese año, hasta llegar a 5 cm antes del derrumbe) y se

emitieron alertas. Esto permitió que se llevaron a cabo medidas preventivas: se desvió el tráfico en las carreteras cercanas al centro de visitantes, se limitó el acceso y se evacuó al personal. (BlogLemu, 2013).

Figura 1.1

Deslizamiento de tierras de la mina de cobre de Bingham Canyon.



En el Perú, han ocurrido sucesos de inestabilidad en taludes y presas de relaves, pero la mayoría no se han divulgado. La experiencia revela que la mayor parte de estos colapsos inesperados en estructuras geotécnicas pueden evitarse con una instrumentación apropiada, un monitoreo continuo que va de la mano con el análisis de los datos de su instrumentación según (Carita & Vilcapaza, 2022).

1.2.4. Piezómetros de cuerda vibrante GEOKON 4500

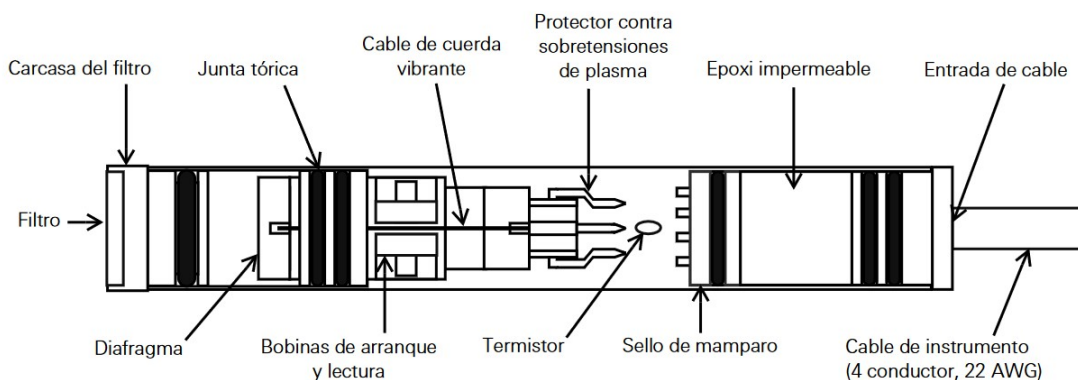
El piezómetro de cuerda vibrante GEOKON modelo 4500 es un sensor geotécnico diseñado para medir la presión de poros en suelos y estructuras, así como la elevación del nivel freático en obras como presas, túneles y rellenos. Su principio de funcionamiento se basa en un diafragma de acero inoxidable que está conectado a una cuerda o alambre vibrante dentro del cuerpo del sensor. Cuando la presión intersticial del agua actúa sobre

el diafragma, este se deforma ligeramente, lo que modifica la tensión del alambre y, por ende, su frecuencia de vibración. Esta frecuencia es registrada por una bobina interna y traducida en una señal eléctrica, que posteriormente puede convertirse en unidades de ingeniería como presión o altura de columna de agua.

El modelo 4500 de (GEOKON, 2026) incluye componentes adicionales como filtros de 50 micras para proteger el diafragma, un termistor para registrar la temperatura interna, y una carcasa sellada con epóxicos para resistir condiciones subterráneas hostiles.

Figura 1.2

Piezómetro de cuerda vibrante Geokon 4500.



1.2.5. Unidades brutas y de ingeniería

En la instrumentación geotécnicas, es común que los datos obtenidos inicialmente estén en unidades brutas (raw o crudas). Estas son las unidades no procesadas directamente entregadas por el sensor (frecuencias, counts o milivoltios), las cuales no representan directamente una magnitud física comprensible. Para tomar decisiones de ingeniería, dichas lecturas deben convertirse a unidades de ingeniería, es decir, unidades físicas significativas como presión (kPa, psi) o altura de columna de agua (mH₂O, metros de agua).

Unidades brutas, son la salida directa del sensor sin convertir. Corresponden a lo que el instrumento mide internamente, típicamente una señal eléctrica o digital. Por ejemplo, en un piezómetro de cuerda vibrante la lectura cruda puede darse en términos de frecuencia

natural del alambre o en "dígitos"(un número proporcional al cuadrado de la frecuencia). En un transductor de presión eléctrico, la unidad bruta podría ser un voltaje o una corriente (miliamperios) de salida. Estas unidades brutas no son inmediatamente interpretables en términos físicos (no nos dicen directamente cuánta presión o nivel de agua hay).

En cambio, las unidades de ingeniería son aquellas que traducen las lecturas internas del sensor a valores comprensibles y útiles para el análisis técnico. Estas unidades permiten interpretar fenómenos físicos como el nivel de agua subterránea o la presión de poros en términos estándar, como metros de columna de agua (mH₂O), metros sobre el nivel del mar (msnm) o kilopascales (kPa). Para obtenerlas, se aplican ecuaciones de conversión que incorporan factores de calibración y condiciones de instalación, lo cual hace posible su uso directo en informes, gráficos y criterios de toma de decisiones en obras de ingeniería geotécnica.

1.2.6. Fórmulas de conversión de piezómetros de cuerda vibrante

Aunque los piezómetros de cuerda vibrante operan bajo el mismo principio físico, las fórmulas de conversión de unidades pueden presentar ligeras variaciones entre fabricantes. Estas diferencias no se dan en el tipo de ecuaciones empleadas (que suelen seguir modelos lineales o polinomiales estándar) sino en la notación, signos, unidades o estructura del cálculo (por ejemplo, si se expresan en Hz, periodos o dígitos).

Por ello, es fundamental aplicar las fórmulas específicas definidas en los certificados técnicos de cada sensor. En el presente estudio se utiliza exclusivamente instrumentación GEOKON modelo 4500, y se emplean las ecuaciones provistas por dicho fabricante. No obstante, también se incluyen fórmulas de marcas como Geosense y Soil Instruments, con fines comparativos, para evidenciar las particularidades que pueden existir entre diferentes proveedores.

■ GEOKON

• Cálculo de dígitos (digits)

El valor de los dígitos se calcula de la siguiente manera:

$$\text{Digits} = \frac{\text{Hz}^2}{1000} \quad \text{o} \quad \text{Digits} = \left(\frac{1}{\text{Per}} \right)^2 \times 10^{-3}$$

Donde:

- Hz es la frecuencia de vibración del cable del piezómetro en Hz.
- Per es la inversa de Hz.

• **Cálculo de presión en unidades de ingeniería**

Los digits son directamente proporcionales a la presión aplicada, como puede verse en la siguiente ecuación:

$$P = (R_1 - R_0) G$$

Donde:

- P es la presión en kPa.
- R₁ es la lectura actual en digits.
- R₀ es la lectura inicial (instalación) en digits.
- G es factor de calibración lineal en kPa/digits.

Los informes de calibración exhiben la presión expresada en diferentes unidades de ingeniería a través de factores multiplicativos como muestra en la Tabla 1.1.

• **Conversión de Temperatura (Termistor de 3 KΩ)**

Para el cálculo de la temperatura en las unidades de ingeniería (°C), como en la mayoría de los piezómetros de cuerda vibrante, la conversión de las lecturas de temperatura a unidades de ingeniería se realiza mediante la ecuación de Steinhart–Hart, la cual permite estimar la temperatura a partir de la resistencia medida por el termistor.

$$T = \frac{1}{A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3} - 273,15$$

Tabla 1.1

Tabla de Conversión de Unidades de Presión

Desde → Hasta ↓	psi	"H ₂ O	H ₂ O	mm H ₂ O	m H ₂ O	"HG	mm HG	atm	mbar	bar	kPa	MPa
psi	1	,036127	,43275	,0014223	1.4223	,49116	,019337	14,696	,014503	14.5039	,14503	145,03
"H ₂ O	27,730	1	12	,039372	39,372	13,596	,53525	406,78	,40147	401,47	4.0147	4016,1
H ₂ O	2.3108	,08333	1	,003281	3.281	1,133	,044604	33.8983	,033456	33.4558	,3346	334,6
mm H ₂ O	704,32	25,399	304,788	1	1000	345,32	13,595	10332	10,197	10197	101,97	101970
m H ₂ O	,70432	,025399	,304788	,001	1	,34532	,013595	10,332	,010197	10,197	,10197	101,97
"HG	2,036	,073552	,882624	,0028959	2.8959	1	,03937	29,920	,029529	29,529	,2953	295,3
mm HG	51,706	1.8683	22.4196	,073558	73,558	25,4	1	760	,75008	750,08	7.5008	7500,8
atm	,06805	,002458	,029499	,0000968	,0968	,03342	,001315	1	,000986	,98692	,009869	9,869
mbar	68,947	2.4908	29.8896	,098068	98,068	33,863	1.3332	1013,2	1	1000	10	10000
bar	,068947	,00249	,029889	,0000981	,098068	,033863	,001333	1.0132	,001	1	,01	10
kPa	6.8947	,24908	2.98896	,0098068	9.8068	3.3863	,13332	101,320	,1	100	1	1000
MPa	,006895	,000249	,002988	,0000098	,009807	,003386	,000133	,101320	,0001	,1	,001	1

Donde:

- T es la temperatura en °C.
- $\ln(R)$ es el logaritmo natural de la resistencia del termistor.
- $A = 1,4051 \times 10^{-3}$.
- $B = 2,369 \times 10^{-4}$.
- $C = 1,019 \times 10^{-7}$.

• **Corrección de Temperatura**

Los piezómetros GEOKON están contruidos para minimizar los efectos térmicos, pero conservan un pequeño coeficiente de temperatura que se especifica en su certificado de calibración (GEOKON, 2026). Normalmente no necesitan ajustes en condiciones estables, pero es factible modificarlos usando el termistor interno para medir la temperatura en situaciones cambiantes. La ecuación para corregir la temperatura es la siguiente:

$$P_T = (T_1 - T_0) K$$

Donde:

- P_T es la corrección por temperatura en kPa.
- T_1 es la temperatura actual en °C.

- T_0 es la temperatura inicial (instalación) en °C.
- K es factor termal en kPa/°C

- **Presión calculada por polinomio de segundo orden**

La linealidad de la mayoría de los sensores es de $\pm 0,2\%$ F.S., por lo que el error suele ser mínimo, no obstante, se puede utilizar un polinomio de segundo grado para aumentar la precisión. La fórmula de conversión con algunos parámetros ya explicados anteriormente, agregando unos parámetros:

$$P = AR_1^2 + BR_1 + C + K(T_1 - T_0) - (S_1 - S_0)$$

Donde:

- A y B son coeficientes determinados en el certificado de calibración del instrumento.
- C es una constante calculada imponiendo la condición $P = 0$ y considerando R_1 como la lectura cero correspondiente al estado inicial del sensor en la ecuación polinomial.
- S_1 es la lectura actual del barómetro, expresada en kPa.
- S_0 es la lectura inicial del barómetro al momento de la instalación, expresada en kPa.

En la herramienta desarrollada se emplean dos expresiones principales para la conversión de los registros brutos a unidades de ingeniería. La primera corresponde a **la estimación de la presión, mediante una relación lineal que incorpora la corrección por temperatura**, cuyo resultado se expresa en megapascales (MPa) y posteriormente se convierte a metros de columna de agua (mH₂O), a partir de los cuales se calcula la cota piezométrica del sensor.

$$P = (R_1 - R_0)G + (T_1 - T_0)K$$

La segunda expresión permite **determinar la temperatura a partir de la resistencia medida por el termistor, utilizando la ecuación de Steinhart–Hart.**

$$T = \frac{1}{A + B \ln(R) + C (\ln(R))^3} - 273,15$$

■ GEONSENSE

El fabricante inglés (Geosense, 2020) indica que, para conseguir valores de ingeniería, es preciso utilizar los factores de calibración específicos de cada sensor, primero se deben transformar las lecturas en dígitos lineales. A continuación, se detallan las ecuaciones siguientes.

- **Cálculo lineal**

$$P = K (L_1 - L_0)$$

Donde:

- K es el factor lineal de conversión a kPa.
- L_1 es la lectura actual del sensor.
- L_0 es la lectura inicial del sensor.

- **Cálculo polinomial**

$$P = (A L_1^2) + (B L_1) - (A L_0^2) - (B L_0)$$

Donde:

- A y B son parámetros proporcionados por el fabricante.
- L_0 es la lectura lineal base.
- L_1 es la lectura lineal actual.

■ SOIL INSTRUMENTS:

Instruments, 2020 indica las siguientes fórmulas de conversión para las unidades de ingeniería.

- **Cálculo lineal**

$$E = G (R_0 - R_1)$$

Donde:

- E es la unidad de ingeniería resultante.
- G es el factor de calibre lineal.
- R_0 es la lectura inicial del sensor.
- R_1 es la lectura inicial del sensor.

- **Cálculo polinomial**

$$E = A R_1^2 + B R_1 - A R_0^2 - B R_0$$

Donde:

- E es la magnitud resultante en unidades de ingeniería.
- A y B son los coeficientes polinómicos obtenidos del certificado de calibración.
- R_1 es la lectura lineal actual.
- R_0 es la lectura lineal base o lectura cero registrada durante la instalación.

Figura 1.3

Certificado de calibración típico de Piezómetro de Cuerda Vibrante de la marca GEOKON.

GEOKON®							
<u>Vibrating Wire Pressure Transducer Calibration Report</u>							
Model Number: <u>4500S-350 kPa</u>				Date of Calibration: <u>November 09, 2023</u>			
Serial Number: <u>2317618</u>				This calibration has been verified/validated as of 11/13/2023			
Calibration Instruction: <u>CI-Pressure Transducer (7 kPa~3.5 MPa)</u>				Barometric Pressure: <u>990.5 mbar</u>			
Cable Length: <u>40 feet</u>				Technician: <i>Dean O. Cowdery</i>			
Applied Pressure (kPa)	Gauge Reading 1st Cycle	Gauge Reading 2nd Cycle	Average Gauge Reading	Calculated Pressure (Linear)	Error Linear (%FS)	Calculated Pressure (Polynomial)	Error Polynomial (%FS)
0.0	8888	8888	8888	0.467	0.13	0.008	0.00
70.0	8293	8293	8293	69.96	-0.01	69.99	0.00
140.0	7696	7696	7696	139.7	-0.07	140.0	0.01
210.0	7096	7097	7097	209.7	-0.09	210.0	-0.01
280.0	6494	6495	6495	280.0	0.00	280.1	0.01
350.0	5891	5892	5892	350.5	0.13	350.0	-0.01
(kPa) Linear Gauge Factor (G): <u>-0.1168</u> (kPa/ digit)							
Polynomial Gauge factors: A: <u>-3.415E-07</u> B: <u>-0.1118</u> C: _____							
Thermal Factor (K): <u>-0.1028</u> (kPa/ °C)							
Calculate C by setting P=0 and R ₁ = initial field zero reading into the polynomial equation							
(psi) Linear Gauge Factor (G): <u>-0.01694</u> (psi/ digit)							
Polynomial Gauge Factors: A: <u>-4.953E-08</u> B: <u>-0.01621</u> C: _____							
Thermal Factor (K): <u>-0.01491</u> (psi/ °C)							
Calculate C by setting P=0 and R ₁ = initial field zero reading into the polynomial equation							
Calculated Pressures: Linear, P = G(R ₁ - R ₀) + K(T ₁ - T ₀) - (S ₁ - S ₀) [*]							
Polynomial, P = AR ₁ ² + BR ₁ + C + K(T ₁ - T ₀) - (S ₁ - S ₀) [*]							
<small>*Barometric pressures expressed in kPa or psi. Barometric compensation is not required with vented transducers.</small>							
Factory Zero Reading: <u>8894</u>		Temperature: <u>21.6</u> °C		Barometer: <u>990.5</u> mbar			
<small>The above instrument was found to be in tolerance in all operating ranges. The above named instrument has been calibrated by comparison with standards traceable to the NIST, in compliance with ANSI Z540-1.</small>							
<small>This report shall not be reproduced except in full without written permission of Geokon.</small>							

Figura 1.4

Certificado de calibración típico de Piezómetro de Cuerda Vibrante de la marca GEOSENSE.



GEOSENSE QUALITY FORM
GQF-149
ISS. 11
DATE : AUG-24
SIG. GC

Nova House, Rougham Industrial Estate, Rougham, Bury St Edmunds
 Tel: +44(0)1359 270457 - Fax: +44(0)1359 272860
 Website: www.geosense.co.uk

STANDARD VW PIEZOMETER LAE CALIBRATION

Model:	VWP-3000	Cal Date:	05/08/2025	Readout No:	2108
Serial No:	383297	Baro:	1014	Cable Length:	100m
Works ID:	G38 5 72	Temp °C:	20	M Marking:	1963m

Applied Pressure		Readings [digit]			Calculated Pressure		Error % FSO	
psi	kPa	1st Cycle	2nd Cycle	avg.[digit]	lin.[kPa]	polyn.[kPa]	linear	polynomial
0.0	0.0	9084.1	9085.1	9084.6	-0.7	0.3	-0.07	0.03
30.2	208.0	8341.4	8342.6	8342.0	207.7	207.5	-0.02	-0.04
60.3	416.0	7598.0	7598.9	7598.5	416.5	415.7	0.05	-0.03
90.5	624.0	6855.0	6855.8	6855.4	625.1	624.3	0.11	0.03
120.7	832.0	6115.8	6116.6	6116.2	832.7	832.5	0.07	0.05
150.8	1040.0	5382.5	5383.1	5382.8	1038.6	1039.6	-0.13	-0.03

CALIBRATION FACTORS

	kPa per digit	psi per digit	mH ₂ O per digit
Linear Factor (K)	-2.80768E-1	-4.07206E-2	-2.86305E-2
	kPa	psi	mH ₂ O
Poly Factor (A)	5.70636E-7	8.27609E-8	5.81889E-8
Poly Factor (B)	-2.89024E-1	-4.19179E-2	-2.94723E-2
Poly Factor (C)			
	kPa per °C	psi per °C	mH ₂ O per °C
Thermal (T)	4.04859E-1	5.87178E-2	4.12843E-2

THE EQUIPMENT USED IN THE CALIBRATION OF THE PRODUCT DETAILED ABOVE IS TRACEABLE TO NATIONAL/INTERNATIONAL STANDARDS

$$\text{Digits} = \text{Hz}^2 \times 10^{-3}$$

$$\text{Linear calc} = k \text{ (kPa)} * (\text{Current Reading} - \text{Site Zero Reading}) + T * (\text{Current Temp} - \text{Site Zero Temp})$$

$$\text{Polynomial calculation} = A * (\text{Reading})^2 + B * (\text{Reading}) + C + T * (\text{Current Temp} - \text{Site Zero Temp})$$

$$C = -A * (\text{Site Zero Reading})^2 - B * (\text{Site Zero Reading})$$

CALIBRATED TO UKAS TRACEABLE STANDARD - ISO 9001:2015

THIS IS AN ELECTRONIC CERTIFICATE AND IS VALID WITHOUT A SIGNATURE

M MARKING TAKEN FROM SENSOR END, USED AS AN INDICATOR

Figura 1.5

Certificado de calibración típico de Piezómetro de Cuerda Vibrante de la marca SOIL.



Bell Lane, Uckfield, East Sussex
 TN22 1QL United Kingdom t: +44 (0) 1825 765044 e: info@soilinstruments.com w: www.soilinstruments.com
 Soil Instruments Limited. Registered in England. Number: 07960087, Registered Office: 3rd Floor, 1 Ashley Road, Altrincham, Cheshire, WA14 2DT, UK

VIBRATING WIRE INSTRUMENTS CALIBRATION CERTIFICATE

Instrument Type : W4 Vibrating Wire Piezometer **Serial No.** : 058194
Instrument Range : 0.00 to 500.0 kPa **Calibration Date** : 08/06/2017
Gauge Factors in kPa **Ambient Temperature** : 23°C
Period Gauge Factor (K): 2285.7650000 **Barometric Pressure** : 1009 mbar
Linear Gauge Factor (G): (kPa/digit)0.2285800 **Calibration Technician** : John Kingshott
Polynomial Gauge Factor A: 0.000000589583500 **Calibration Equipment:**
 Mensor APC 600
 AVW200 Data Logger
Polynomial Gauge Factor B: -0.2347881000 **Regression Zero** : 6360.0
Polynomial Gauge Factor C:** 1469.835000

Applied (kPa)	Reading (Period)	Reading F ² /1000	Calculated (Linear)	Error %FS (Linear)	Linear Increment	Calculated (Polynomial)	Error %FS (Polynomial)
0.00	3964.7	6361.7	-0.379	-0.08	0.0	0.045	0.01
50.00	4035.0	6142.0	49.840	-0.03	-219.7	50.008	0.00
100.00	4109.1	5922.6	99.989	0.00	-219.4	99.960	-0.01
150.00	4187.3	5703.3	150.116	0.02	-219.3	149.946	-0.01
200.00	4270.2	5484.1	200.220	0.04	-219.2	199.966	-0.01
250.00	4358.1	5265.1	250.278	0.06	-219.0	249.996	0.00
300.00	4451.6	5046.3	300.291	0.06	-218.8	300.038	0.01
350.00	4551.3	4827.6	350.281	0.06	-218.7	350.113	0.02
400.00	4657.3	4610.3	399.950	-0.01	-217.3	399.923	-0.02
450.00	4771.8	4391.8	449.894	-0.02	-218.5	450.065	0.01
500.00	4894.3	4174.7	499.518	-0.10	-217.1	499.941	-0.01

Formulae: Linear* E = G(R0 - R1)
 Polynomial** E = AR1² + BR1 + C

* The zero reading should be established on site by the user on installation.
 ** The site value of C must be calculated using the formula C = -(AR0² + BR0)

The instrument detailed hereon has, as applicable, been tested and calibrated in accordance with procedures, which are part of our ISO 9001:2008 Quality Management System, and unless otherwise indicated, performs within ± 0.10% (Polynomial) as specified. Thus, the instrument conforms in all respects to our relevant specifications and drawings.

Certified: Line MANAGER

1.2.7. Procesamiento de Datos con Python

- **Procesamiento de datos**

El procesamiento de datos se refiere al proceso de reunir, modificar, estructurar y examinar datos en bruto para convertirlos en información que sea valiosa y relevante. Supone una serie de etapas organizadas, como la recopilación, el procesamiento y el análisis de datos, empleando instrumentos de software y hardware para obtener información que ayude a tomar decisiones, optimizar operaciones y cumplir con normativas en varios ámbitos (Krantz & Jonker, 2025).

- **Procesamiento de datos con Python**

Dado su versatilidad y facilidad de uso, Python, que fue desarrollado en 1991, se ha establecido como uno de los lenguajes de programación más utilizados. Su potencial va mucho más allá de lo que a menudo se le llama "lenguaje de scripting", ya que es muy utilizado en aplicaciones críticas, en el desarrollo web usando frameworks y que son necesarios para cualquier proyecto de visión por computadora o IA. Según (McKinney, 2022), su uso en investigación e industria ha aumentado desde el año 2000, sobresaliendo en la visualización y el análisis de datos debido a bibliotecas como pandas. Su combinación de propósito general y potencia en ciencia de datos lo hace una opción fuerte contra herramientas como R, MATLAB o SAS.

1.2.8. Equipos de telemetría y geotecnia

- **Nodos de cuerda vibrante**

Son dispositivos de campo que se conectan a sensores (piezómetros, celdas de carga, extensómetros, inclinómetros, etc.) para captar sus señales y transmitirlos hacia un sistema de adquisición. Un nodo típico admite diferentes tipos de sensores y está diseñado para funcionar durante largos periodos con una batería interna; por ejemplo, los nodos de la marca Ackcio están pensados para monitorizar diversos sensores de geotecnia y estructuras, disponen de batería de larga duración y pueden

enviar o recibir datos a grandes distancias en entornos sobre o bajo tierra. Estos nodos realizan lecturas periódicas (configurables) y envían los datos mediante una red inalámbrica (Ackcio Mesh) al gateway del sistema; además almacenan las medidas localmente y permiten modificar intervalos de muestreo o consultar datos de forma remota (Ackcio, 2025b).

Figura 1.6

Nodo Ackcio del tipo cuerda vibrante.



■ Gateway Ackcio

El Ackcio Gateway es el componente maestro del sistema Ackcio Beam y coordina toda la adquisición de datos. Este gateway recibe los datos de los nodos y los envía a la plataforma externa elegida para analizar y registrar la información. La comunicación es bidireccional: además de recibir datos, el gateway permite enviar configuraciones a los nodos, como cambios en la frecuencia de muestreo. Entre sus características se incluyen 16 GB de memoria interna para almacenar lecturas, software Snape integrado con acceso remoto, batería de respaldo que mantiene la radio operativa ante fallos de energía y opciones de conectividad por LAN, Wi-Fi o enlaces celulares. El sistema opera como una solución de borde totalmente privada

que sube los datos directamente a los sistemas del usuario sin recurrir a la nube, ofreciendo mayor seguridad y privacidad (Ackcio, 2025a).

Figura 1.7

Puerta de enlace de Ackcio (Gateway).



Capítulo II: Marco Metodológico

En el presente capítulo se describe la metodología empleada para el desarrollo de la investigación, detallando el tipo y diseño del estudio, el proceso de contrastación de la hipótesis, la población y muestra considerada, así como las técnicas e instrumentos utilizados para la recolección, análisis y procesamiento de los datos piezométricos mediante la herramienta automatizada desarrollada en Python.

2.1. Tipo y Enfoque de Investigación

La presente investigación es de tipo **aplicada**, debido a que se orienta al desarrollo de una herramienta tecnológica destinada a resolver una problemática concreta relacionada con el procesamiento de datos de instrumentación geotécnica. En ese sentido, el estudio se enmarca dentro de una investigación tecnológica, al proponer una solución automatizada para la conversión de datos brutos de piezómetros a unidades de ingeniería, con aplicación directa en el monitoreo del reservorio Shapiringo.

El enfoque de la investigación es **cuantitativo**, ya que se basa en el análisis numérico de datos instrumentales y en la evaluación objetiva de los resultados obtenidos mediante diferentes métodos de procesamiento. De manera complementaria, se incorpora un enfoque cualitativo a través del juicio de expertos, con la finalidad de evaluar la utilidad y aplicabilidad operativa de la herramienta desarrollada.

2.2. Diseño de Investigación

La investigación se desarrolló bajo un diseño **no experimental** de alcance descriptivo correlacional, debido a que no se manipuló deliberadamente ninguna variable, sino que se analizaron los datos tal como fueron generados por los piezómetros instalados en el reservorio Shapiringo. El estudio describe el comportamiento de los datos procesados y, a su vez, analiza la relación existente entre los resultados obtenidos mediante el procesamiento automatizado en Python y aquellos calculados manualmente en Microsoft Excel.

La correlación entre ambos métodos de procesamiento fue evaluada mediante el coeficiente de correlación de Pearson, permitiendo cuantificar el grado de concordancia entre los resultados y validar la precisión del sistema automatizado. Asimismo, la investigación presenta un corte transversal, ya que el análisis se realizó sobre un conjunto de datos correspondiente a un periodo específico, sin seguimiento experimental continuo en el tiempo. tiempo.

2.3. Contraste de Hipótesis

La hipótesis de la investigación plantea que la automatización del procesamiento de datos de piezómetros mediante una herramienta desarrollada en Python permite convertir de manera precisa las unidades brutas a unidades de ingeniería y mejorar la confiabilidad y utilidad de la información geotécnica obtenida en el reservorio Shapiringo.

El contraste de la hipótesis se realizó mediante un enfoque cuantitativo y cualitativo. En primer lugar, la validación cuantitativa se efectuó comparando los resultados obtenidos con la herramienta automatizada frente al cálculo manual realizado en Microsoft Excel. Para ello, se empleó el coeficiente de correlación de Pearson (r), evaluando la concordancia entre ambos métodos para las variables nivel piezométrico (mH_2O), temperatura ($^{\circ}C$) y cota piezométrica (msnm). La hipótesis se consideró aceptada cuando el valor del coeficiente de correlación fue $r \geq 0.95$ por instrumento y por variable.

De manera complementaria, se realizó una validación cualitativa mediante un cuestionario de juicio experto basado en una escala Likert de cinco niveles. Este instrumento permitió evaluar la utilidad, claridad y aplicabilidad operativa de la herramienta automatizada, así como de los reportes generados. La hipótesis se consideró validada desde el enfoque cualitativo cuando el puntaje promedio global obtenido fue igual o superior a 4.5.

2.4. Población y Muestra

2.4.1. Población

Constituida por la totalidad de registros generados por los once piezómetros de cuerda vibrante instalados en el reservorio Shapiringo, obtenidos a través de la red de monitoreo con tecnología Ackcio, que integra gateway y nodos para la transmisión de datos.

2.4.2. Muestra

Corresponde al conjunto de lecturas comprendidas entre el 18 de abril de 2024 y el 18 de noviembre de 2024, período en el cual se recopilieron más de novecientas mediciones por instrumento, utilizadas para el análisis y procesamiento en el presente estudio.

2.5. Técnicas e Instrumentos de Recolección de Datos

2.5.1. Técnicas empleadas

- **Estudio de Caso:** Aplicado al sistema de monitoreo piezométrico del reservorio Shapiringo, permitiendo analizar el comportamiento de los datos generados por los piezómetros en un entorno operativo real.
- **Observación Directa:** Seguimiento del funcionamiento del sistema de adquisición de datos y revisión de los registros generados por los sensores y la gateway Ackcio..
- **Medición del Rendimiento:** Evaluación de la concordancia entre los resultados obtenidos mediante el procesamiento automatizado en Python y el cálculo manual realizado en Microsoft Excel.

2.5.2. Instrumentos y Herramientas

Para la recopilación de datos se utilizarán las siguientes herramientas:

- **Archivos CSV (Ackcio Gateway):** Contienen los datos crudos de los piezómetros, incluyendo lecturas de frecuencia, temperatura y marcas de tiempo.

- **Certificados de calibración de piezómetros:** Proporcionan los parámetros técnicos (G, K y coeficientes polinómicos) necesarios para la conversión de unidades brutas a unidades de ingeniería.
- **Protocolos de instalación de piezómetros:** Documentos técnicos que consignan el TAG del sensor, referencias iniciales (R_0 y T_0), ubicación y cota de instalación.
- **Google Colaboratory (Colab):** Entorno utilizado para la ejecución de la herramienta automatizada desarrollada en Python.
- **Microsoft Excel:** Herramienta empleada como referencia para el cálculo manual y la validación cuantitativa de los resultados.
- **Cuestionario de juicio experto (escala Likert):** Instrumento utilizado para la recolección de datos cualitativos, orientado a evaluar la utilidad, claridad y aplicabilidad operativa de la herramienta automatizada y los reportes generados.

2.5.3. Equipos de medición y adquisición de datos

- **Piezómetros de cuerda vibrante GEOKON 4500:** Sensores utilizados para medir la presión intersticial mediante variaciones de frecuencia.
- **Nodos inalámbricos Ackcio:** Dispositivos conectados a cada piezómetro para registrar y transmitir lecturas de frecuencia y temperatura.

Figura 2.1

Vista general del nodo PE-01 ubicado alrededor del reservorio.



- **Gateway Ackcio:** Unidad central del sistema encargada de recopilar la información enviada por los nodos y generar los archivos de datos sin procesar.

Figura 2.2

Gateway Ackcio instalada en el reservorio.



2.6. Análisis y Procesamiento de Datos

El análisis y procesamiento de los datos se realizó mediante una herramienta automatizada desarrollada en Python y ejecutada en el entorno Google Colab. El procedimiento incluyó la importación de archivos CSV, la limpieza básica de datos, la aplicación de fórmulas de conversión de unidades brutas a unidades de ingeniería y el cálculo de variables técnicas como nivel piezométrico, cota piezométrica y temperatura.

Posteriormente, los datos procesados fueron organizados en estructuras tabulares estandarizadas y utilizados para la generación de visualizaciones gráficas, reportes técnicos en formato PDF y archivos CSV de salida. Para la validación cuantitativa, se compararon

los resultados obtenidos con la herramienta automatizada frente al procesamiento manual en Excel, empleando el coeficiente de correlación de Pearson. El análisis cualitativo se realizó a partir de las respuestas obtenidas en el cuestionario de juicio experto.

Capítulo III: Resultados

3.1. Implementación del sistema automatizado de procesamiento de datos piezométricos

La implementación del sistema automatizado permitió estructurar un flujo de procesamiento capaz de manejar datos crudos de piezómetros de cuerda vibrante de manera consistente. El sistema integra la información de calibración e instalación de los instrumentos y ejecuta de forma secuencial las etapas necesarias para la conversión de los registros a unidades de ingeniería, constituyendo la base funcional sobre la cual se desarrollan las etapas posteriores de análisis y visualización.

3.1.1. Datos de calibración e instalación de los piezómetros

Para convertir los datos brutos a unidades de ingeniería es indispensable contar, para cada instrumento, con los factores de calibración G (MPa/digit o kPa/digit) y K (MPa/°C o kPa/°C) indicados en el certificado de calibración. Asimismo, para estimar el desplazamiento, se requiere disponer de las referencias de instalación: lectura base o cero (R_0) en digits, temperatura base o cero (T_0) en °C y cota de instalación (msnm), las cuales se encuentran registradas en el protocolo de instalación.

A continuación, se presenta la tabla resumen que consolida estos cinco parámetros para los 11 piezómetros conectados a la red Ackcio.

Tabla 3.1*Parámetros de calibración e instalación utilizados para la conversión de unidades de ingeniería*

TAG	G (MPa/digit)	K (°C/digit)	R₀ (digits)	T₀ (°C)	Cota Inst. (msnm)
PE-01	-0.0001793	-0.0001541	9078.9	21.3	2327.80
PE-02	-0.0001821	-0.00004618	9666.1	20.0	2330.70
PE-03	-0.0001604	0.000003274	9268.0	21.1	2336.20
PE-04	-0.0001831	-0.00008288	9062.5	17.7	2333.80
PE-05	-0.0001634	-0.00003988	9082.2	21.8	2328.80
PCV-01	-0.0001113	-0.00003231	8975.3	18.1	2320.14
PCV-02	-0.0001103	-0.00003369	8989.6	20.3	2325.70
PCV-03	-0.0001156	-0.000004482	8856.2	16.8	2321.01
PCV-04	-0.0001077	0.000004482	8928.9	17.7	2325.71
PCV-05	-0.0001098	-0.00006112	8977.2	23.0	2321.24
PCV-06	-0.0001139	-0.00003185	9046.3	19.3	2325.34

3.1.2. Flujo del funcionamiento de la herramienta

La herramienta implementada en Python opera de la siguiente forma:

3.1.2.1. Ingesta y preparación de datos

En esta primera celda se cargaron los archivos CSV exportados desde la gateway Ackcio y construyó un DataFrame base con nombres de columnas consistentes, que incluyen: hora y fecha, lecturas del sensor 1 (digits), temperatura (°C), temperatura (Ohm) y calidad de señal (%). A partir de las lecturas crudas, se ejecutaron dos conversiones directas que no requieren parámetros de fábrica ni de instalación:

- Dado que la fuente viene expresada en Hz, las lecturas en digits se obtuvieron aplicando la relación:

$$\text{digits} = \frac{\text{Hz}^2}{1000}$$

- La temperatura en °C se estimó a partir de la resistencia en Ohm mediante la fórmula logarítmica de Steinhart–Hart.

Finalmente, la celda 1 culmina su ejecución generando un archivo CSV intermedio con

el sufijo "_digits.csv", el cual contiene el tiempo normalizado, las lecturas en digits, la temperatura en °C y los demás campos útiles. Este archivo constituye la entrada para las celdas de procesamiento posteriores.

Figura 3.1

Se carga el archivo al entorno de Colab para iniciar con el procesamiento.

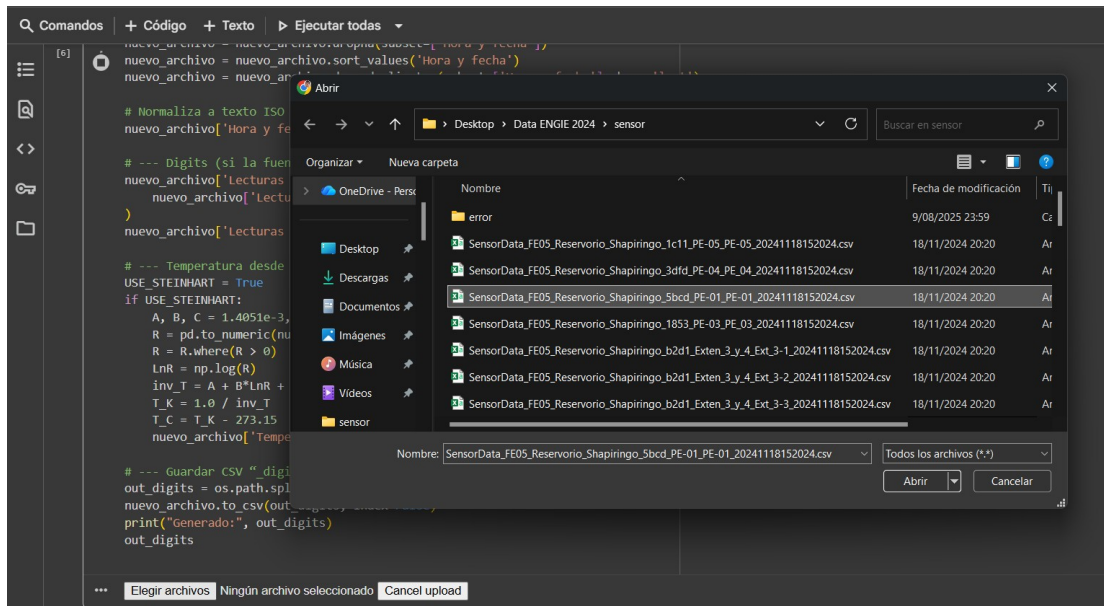


Figura 3.2

Visualización de los datos brutos (sin procesar) del archivo CSV del PE-01 en el entorno de Colab.

Data Time (UTC-05:00)	PE-01-Reading-Frequency (Digits)	PE-01-RawReading-Frequency (Hz)	PE-01-Reading-Temperature (C)	PE-01-RawReading-Temperature (Ohm)	PE-01-Reading-SignalQuality (%)	PE-01-RawReading-Sig
2024/04/18 18:00:00	3018	3018	4482	4482	99	99
2024/04/18 19:00:00	3017.9	3017.9	4482	4482	99	99
2024/04/18 20:00:00	3017.8	3017.8	4479	4479	99	99
2024/04/18 21:00:00	3017.77	3017.77	4483	4483	99	99
2024/04/18 22:00:00	3017.71	3017.71	4483	4483	99	99
2024/04/19 00:00:00	3017.72	3017.72	4483	4483	99	99
2024/04/19 01:00:00	3017.75	3017.75	4482	4482	99	99
2024/04/19 02:00:00	3017.8	3017.8	4482	4482	99	99
2024/04/19 03:00:00	3017.86	3017.86	4482	4482	99	99
2024/04/19 04:00:00	3017.9	3017.9	4482	4482	99	99
2024/04/19 05:00:00	3017.89	3017.89	4486	4486	99	99
2024/04/19 06:00:00	3017.88	3017.88	4482	4482	99	99
2024/04/19 07:00:00	3017.88	3017.88	4483	4483	99	99
2024/04/19 08:00:00	3017.83	3017.83	4482	4482	99	99
2024/04/19 09:00:00	3017.79	3017.79	4482	4482	99	99
2024/04/19 10:00:00	3017.8	3017.8	4483	4483	99	99
2024/04/19 11:00:00	3017.84	3017.84	4482	4482	99	99
2024/04/19 12:00:00	3017.91	3017.91	4482	4482	99	99
2024/04/19 13:00:00	3017.99	3017.99	4482	4482	99	99
2024/04/19 14:00:00	3018.06	3018.06	4483	4483	99	99
2024/04/19 15:00:00	3018.14	3018.14	4483	4483	99	99
2024/04/19 16:00:00	3018.18	3018.18	4481	4481	99	99
2024/04/19 17:00:00	3018.16	3018.16	4482	4482	99	99
2024/04/19 18:00:00	3018.06	3018.06	4480	4480	99	99
2024/04/19 19:00:00	3017.98	3017.98	4482	4482	99	99
2024/04/19 20:00:00	3017.87	3017.87	4481	4481	99	99
2024/04/19 21:00:00	3017.78	3017.78	4480	4480	99	99
2024/04/19 22:00:00	3017.72	3017.72	4482	4482	99	99
2024/04/19 23:00:00	3017.71	3017.71	4482	4482	99	99

Figura 3.3

CSV retornado después de ejecutar la celda 1, las unidades del PE-01 están en digits y en °C.

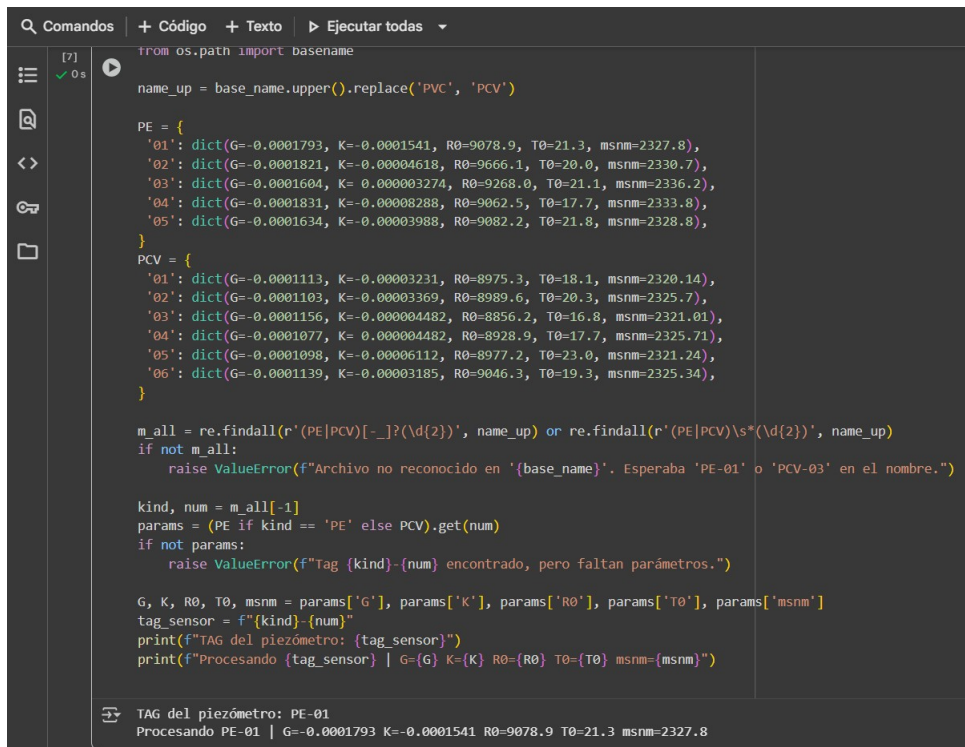
Hora y fecha	Lecturas de sensor 1 (digits)	Temperatura (°C)	Temperatura (Ohm)	Calidad de Señal (%)
2024-04-18 18:00:00	9108.324	16.08	4482	99
2024-04-18 19:00:00	9107.72041	16.08	4482	99
2024-04-18 20:00:00	9107.116840000002	16.09	4479	99
2024-04-18 21:00:00	9106.9357729	16.07	4483	99
2024-04-18 22:00:00	9106.5736441	16.07	4483	99
2024-04-18 23:00:00	9106.633983999999	16.07	4482	99
2024-04-19 00:00:00	9106.8150625	16.08	4482	99
2024-04-19 01:00:00	9107.116840000002	16.08	4482	99
2024-04-19 02:00:00	9107.4789796	16.08	4482	99
2024-04-19 03:00:00	9107.72041	16.08	4482	99
2024-04-19 04:00:00	9107.660052099998	16.06	4486	99
2024-04-19 05:00:00	9107.599694400002	16.08	4482	99
2024-04-19 06:00:00	9107.599694400002	16.07	4483	99
2024-04-19 07:00:00	9107.2979089	16.08	4482	99
2024-04-19 08:00:00	9107.0564841	16.08	4482	99
2024-04-19 09:00:00	9107.116840000002	16.07	4483	99
2024-04-19 10:00:00	9107.358285600002	16.08	4482	99
2024-04-19 11:00:00	9107.7807681	16.08	4482	99
2024-04-19 12:00:00	9108.263640099998	16.08	4482	99
2024-04-19 13:00:00	9108.6861636	16.07	4483	99
2024-04-19 14:00:00	9109.169059599999	16.07	4483	99
2024-04-19 15:00:00	9109.4105124	16.08	4481	99
2024-04-19 16:00:00	9109.2897856	16.08	4482	99
2024-04-19 17:00:00	9108.6861636	16.09	4480	99
2024-04-19 18:00:00	9108.203280400001	16.08	4482	99
2024-04-19 19:00:00	9107.5393369	16.08	4481	99
2024-04-19 20:00:00	9106.996128400002	16.09	4480	99
2024-04-19 21:00:00	9106.633983999999	16.08	4482	99
2024-04-19 22:00:00	9106.5736441	16.08	4482	99

3.1.2.2. Identificación del instrumento y asignación de parámetros

Esta segunda celda reconoció el piezómetro a partir del nombre del archivo y asigna sus parámetros de calibración e instalación. Primero normalizó la etiqueta en mayúsculas y unificó variantes del nombre (de PVC a PCV). Luego extrae con una expresión regular el código del sensor en formato PE-XX o PCV-XX. Con ese identificador, consultó los diccionarios de parámetros definidos para cada grupo, recuperando los valores correspondientes: G y K (coeficientes de conversión), R_0 y T_0 (referencias de lectura y temperatura), y la cota del sensor (msnm). Si el nombre del archivo no contiene un tag válido o falta la entrada en la tabla de parámetros, el proceso se detiene con un mensaje explícito para evitar continuar con un mapeo incorrecto. Al final, se registró en consola el TAG reconocido (por ejemplo, PE-03) y los parámetros aplicados, dejando trazado qué sensor se procesará en las siguientes etapas

Figura 3.4

Celda 2 con los parámetros de los 11 instrumentos que serán utilizados para la conversión de unidades.



```
from os.path import basename

name_up = base_name.upper().replace('PVC', 'PCV')

PE = {
    '01': dict(G=-0.0001793, K=-0.0001541, R0=9078.9, T0=21.3, msnm=2327.8),
    '02': dict(G=-0.0001821, K=-0.00004618, R0=9666.1, T0=20.0, msnm=2330.7),
    '03': dict(G=-0.0001604, K= 0.00003274, R0=9268.0, T0=21.1, msnm=2336.2),
    '04': dict(G=-0.0001831, K=-0.00008288, R0=9062.5, T0=17.7, msnm=2333.8),
    '05': dict(G=-0.0001634, K=-0.00003988, R0=9082.2, T0=21.8, msnm=2328.8),
}

PCV = {
    '01': dict(G=-0.0001113, K=-0.00003231, R0=8975.3, T0=18.1, msnm=2320.14),
    '02': dict(G=-0.0001103, K=-0.00003369, R0=8989.6, T0=20.3, msnm=2325.7),
    '03': dict(G=-0.0001156, K=-0.000004482, R0=8856.2, T0=16.8, msnm=2321.01),
    '04': dict(G=-0.0001077, K= 0.000004482, R0=8928.9, T0=17.7, msnm=2325.71),
    '05': dict(G=-0.0001098, K=-0.00006112, R0=8977.2, T0=23.0, msnm=2321.24),
    '06': dict(G=-0.0001139, K=-0.00003185, R0=9046.3, T0=19.3, msnm=2325.34),
}

m_all = re.findall(r'(PE|PCV)[-]?(\d{2})', name_up) or re.findall(r'(PE|PCV)\s*(\d{2})', name_up)
if not m_all:
    raise ValueError(f"Archivo no reconocido en '{base_name}'. Esperaba 'PE-01' o 'PCV-03' en el nombre.")

kind, num = m_all[-1]
params = (PE if kind == 'PE' else PCV).get(num)
if not params:
    raise ValueError(f"Tag {kind}-{num} encontrado, pero faltan parámetros.")

G, K, R0, T0, msnm = params['G'], params['K'], params['R0'], params['T0'], params['msnm']
tag_sensor = f"{kind}-{num}"
print(f"TAG del piezómetro: {tag_sensor}")
print(f"Procesando {tag_sensor} | G={G} K={K} R0={R0} T0={T0} msnm={msnm}")
```

TAG del piezómetro: PE-01
Procesando PE-01 | G=-0.0001793 K=-0.0001541 R0=9078.9 T0=21.3 msnm=2327.8

3.1.2.3. Conversión a unidades de ingeniería y cálculo de cota

La tercera celda leyó el archivo `_digits.csv` generado previamente, normalizando los tipos de datos (tiempo, digits y temperatura) y realizó la conversión a presión aplicando los parámetros del sensor identificados en la Celda 2. Para ello, utilizó la relación lineal y se incorporó la compensación por temperatura descrita en los certificados de calibración de los piezómetros, según la siguiente expresión:

$$\text{MPa} = (\text{digits} - R_0) G + (^\circ\text{C} - T_0) K$$

Luego, la presión obtenida se transformó a altura de columna de agua mediante la relación:

$$\text{mH}_2\text{O} = \text{MPa} \times 101,97$$

A partir de este valor, se calculó la cota piezométrica sumando la cota de instalación del sensor:

$$\text{msnm} = \text{msnm}_{\text{sensor}} + \text{mH}_2\text{O}$$

Finalmente, los resultados de la celda 3 se organizaron en las siguientes columnas finales: hora y fecha, sensor (mH₂O), posición del sensor (msnm), temperatura (°C), temperatura (Ohm) y calidad de señal (%). Los datos procesados se exportan como un archivo CSV nombrado con el TAG del piezómetro y la última fecha del período procesado (por ejemplo, Reservorio Shapiringo - PE-01 - 18-11-24.csv).

Figura 3.5

Al completar la ejecución de la celda 3, muestra un mensaje de confirmación.

```
Comandos + Código + Texto ▶ Ejecutar todas ▼

# ==== CELDA 3: Conversión de datos (MPa -> mH2O) y cota ====
import pandas as pd, numpy as np, os

df = pd.read_csv(out_digits)
df['Hora y fecha'] = pd.to_datetime(df['Hora y fecha'], errors='coerce', utc=False)
df = df.dropna(subset=['Hora y fecha']).sort_values('Hora y fecha')
df = df.drop_duplicates(subset=['Hora y fecha'], keep='last')

df['Lecturas de sensor 1 (digits)'] = pd.to_numeric(df['Lecturas de sensor 1 (digits)'], errors='coerce')
df['Temperatura (°C)'] = pd.to_numeric(df['Temperatura (°C)'], errors='coerce')
df = df.dropna(subset=['Lecturas de sensor 1 (digits)', 'Temperatura (°C)'])

# MPa y mH2O
mpa = (df['Lecturas de sensor 1 (digits)'] - R0) * G + (df['Temperatura (°C)'] - T0) * K
mh2o = (mpa * 101.97).round(2)

df['Sensor (mH2O)'] = mh2o
df['Posición de sensor (msnm)'] = (msnm + df['Sensor (mH2O)']).round(2)

# Reordenar columnas
cols = ['Hora y fecha', 'Sensor (mH2O)', 'Posición de sensor (msnm)', 'Temperatura (°C)', 'Temperatura (Ohm)', 'Calidad de Señal (%)']
df = df.reindex(columns=cols)

# Guardado final por TAG + última fecha
end_ts = pd.to_datetime(df['Hora y fecha']).max()
nuevo_nombre = f"Reservorio Shapiringo - {tag_sensor} - {end_ts.strftime('%d-%m-%y')}.csv"
df.to_csv(nuevo_nombre, index=False)
print("Archivo procesado guardado como:", nuevo_nombre)

Archivo procesado guardado como: Reservorio Shapiringo - PE-01 - 18-11-24.csv
```

Figura 3.6

Visualización de los datos en unidades de ingeniería, listos para graficarlos

Hora y fecha	Sensor (mH2O)	Posición de sensor (msnm)	Temperatura (°C)	Temperatura (Ohm)	Calidad de Señal (%)
2024-04-18 18:00:00	-0.46	2327.34	16.08	4482	99
2024-04-18 19:00:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
2024-04-18 20:00:00	-0.43	2327.37	16.09	4479	99
2024-04-18 21:00:00	-0.43	2327.37	16.07	4483	99
2024-04-18 22:00:00	-0.42	2327.38	16.07	4483	99
2024-04-18 23:00:00	-0.42	2327.38	16.07	4483	99
2024-04-19 00:00:00	-0.43	2327.37	16.08	4482	99
2024-04-19 01:00:00	-0.43	2327.37	16.08	4482	99
2024-04-19 02:00:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
2024-04-19 03:00:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
2024-04-19 04:00:00	-0.44	2327.36	16.06	4486	99
2024-04-19 05:00:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
2024-04-19 06:00:00	-0.44	2327.36	16.07	4483	99
2024-04-19 07:00:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
2024-04-19 08:00:00	-0.43	2327.37	16.08	4482	99
2024-04-19 09:00:00	-0.43	2327.37	16.07	4483	99
2024-04-19 10:00:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
2024-04-19 11:00:00	-0.45	2327.35	16.08	4482	99
2024-04-19 12:00:00	-0.45	2327.35	16.08	4482	99
2024-04-19 13:00:00	-0.46	2327.34	16.07	4483	99
2024-04-19 14:00:00	-0.47	2327.33	16.07	4483	99
2024-04-19 15:00:00	-0.48	2327.32	16.08	4481	99
2024-04-19 16:00:00	-0.47	2327.33	16.08	4482	99
2024-04-19 17:00:00	-0.46	2327.34	16.09	4480	99
2024-04-19 18:00:00	-0.45	2327.35	16.08	4482	99
2024-04-19 19:00:00	-0.44	2327.36	16.08	4481	99
2024-04-19 20:00:00	-0.43	2327.37	16.09	4480	99
2024-04-19 21:00:00	-0.43	2327.37	16.08	4482	99
2024-04-19 22:00:00	-0.42	2327.38	16.08	4482	99

3.2. Visualización, análisis y generación de productos técnicos

Sobre la base del procesamiento automatizado, el sistema incorpora funcionalidades orientadas a la visualización, el análisis técnico y la generación de productos derivados de la información piezométrica. Estas funcionalidades permiten organizar los resultados de manera estructurada, definir umbrales operativos por sensor y generar salidas gráficas y documentales que facilitan la interpretación de los datos y su uso en actividades de monitoreo geotécnico.

3.2.1. Herramientas de visualización y análisis

3.2.1.1. Matriz de sensores y umbrales de alerta

En esta celda se incorpora la información técnica de cada piezómetro que alimenta el reporte y el dashboard: tipo, marca/modelo y serie, fecha y modo de instalación, cota de instalación (msnm) y coordenadas UTM 18S (EPSG:32718). Con estos metadatos la herramienta rotula correctamente los gráficos, ubica los sensores y calcula la cota piezométrica con referencia geodésica. Además, se definen umbrales de alerta por sensor (esquema tipo semáforo) que el dashboard usa para colorear valores y resúmenes. En el caso del Reservorio Shapiringo, al no contar con límites operativos oficiales, se adoptaron valores referenciales coherentes con prácticas habituales, únicamente con fines demostrativos para evidenciar la capacidad de la herramienta de configurar criterios de alerta por sensor.

Figura 3.7

Definición de variables de información de cada instrumento utilizada en elaboración del reporte técnico.

```
Q Comandos + Código + Texto ▶ Ejecutar todas
[9] 0.5
# ==== CELDA 4: Matriz de variables por sensor (UTM 18S + umbrales por sensor) ====
SENSORES = {
# --- PE
"PE-01": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500HD - 700kPa", "serie": "1423222",
"fecha_instalacion": "16/01/2015", "instalacion": "Inclinado", "angulo_deg": 45, "profundidad_m": None,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190351.445, "N": 9029779.387, "msnm": 2327.8, "msnm_instalacion": 2327.8},
"fecha_instalacion": "16/01/2015", "instalacion": "Inclinado", "angulo_deg": 45, "profundidad_m": None,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190374.817, "N": 9029881.084, "msnm": 2330.7, "msnm_instalacion": 2330.7},
"PE-02": {"tipo": "Piezómetro de cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500HD - 700kPa", "serie": "1423236",
"fecha_instalacion": "16/01/2015", "instalacion": "Inclinado", "angulo_deg": 45, "profundidad_m": None,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190384.426, "N": 9030000.940, "msnm": 2336.2, "msnm_instalacion": 2336.2},
"PE-03": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500HD - 700kPa", "serie": "1423246",
"fecha_instalacion": "16/01/2015", "instalacion": "Inclinado", "angulo_deg": 45, "profundidad_m": None,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190384.426, "N": 9030000.940, "msnm": 2336.2, "msnm_instalacion": 2336.2},
"PE-04": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500HD - 700kPa", "serie": "1423244",
"fecha_instalacion": "16/01/2015", "instalacion": "Inclinado", "angulo_deg": 45, "profundidad_m": None,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190363.622, "N": 9029960.628, "msnm": 2333.8, "msnm_instalacion": 2333.8},
"PE-05": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500HD - 700kPa", "serie": "1423225",
"fecha_instalacion": "16/01/2015", "instalacion": "Inclinado", "angulo_deg": 45, "profundidad_m": None,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190343.012, "N": 9029842.052, "msnm": 2328.8, "msnm_instalacion": 2328.8},
# --- PCV:
"PCV-01": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500S-350kPa", "serie": "1536694",
"fecha_instalacion": "09/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 31.1,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190330.6, "N": 9029708.1, "msnm": 2320.14, "msnm_instalacion": 2320.14},
"PCV-02": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500S-350kPa", "serie": "1536699",
"fecha_instalacion": "10/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 25.7,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190330.6, "N": 9029708.1, "msnm": 2325.7, "msnm_instalacion": 2325.7},
"PCV-03": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500S-350kPa", "serie": "1536693",
"fecha_instalacion": "18/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 30.2,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190314.3, "N": 9029715.7, "msnm": 2321.01, "msnm_instalacion": 2321.01},
"PCV-04": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500S-350kPa", "serie": "1536698",
"fecha_instalacion": "18/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 25.5,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190314.3, "N": 9029715.7, "msnm": 2325.71, "msnm_instalacion": 2325.71},
"PCV-05": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500S-350kPa", "serie": "1536697",
"fecha_instalacion": "20/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 20.4,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190306.6, "N": 9029699.5, "msnm": 2325.34, "msnm_instalacion": 2325.34},
}
```

Figura 3.8

Definición de umbrales para alertas de los instrumentos, utilizados también en los reportes.

```
Q Comandos + Código + Texto ▶ Ejecutar todas
[9] 0.5
"fecha_instalacion": "10/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 25.7,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190330.6, "N": 9029708.1, "msnm": 2325.7, "msnm_instalacion": 2325.7},
"PCV-03": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500S-350kPa", "serie": "1536693",
"fecha_instalacion": "18/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 30.2,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190314.3, "N": 9029715.7, "msnm": 2321.01, "msnm_instalacion": 2321.01},
"PCV-04": {"tipo": "Piezómetro de cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500S-350kPa", "serie": "1536698",
"fecha_instalacion": "18/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 25.5,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190314.3, "N": 9029715.7, "msnm": 2325.71, "msnm_instalacion": 2325.71},
"PCV-05": {"tipo": "Piezómetro de Cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500S-350kPa", "serie": "1536697",
"fecha_instalacion": "20/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 20.4,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190306.6, "N": 9029699.5, "msnm": 2321.24, "msnm_instalacion": 2321.24},
"PCV-06": {"tipo": "Piezómetro de cuerda Vibrante", "marca": "Geokon", "modelo": "4500S-350kPa", "serie": "1536696",
"fecha_instalacion": "22/12/2015", "instalacion": "Vertical", "angulo_deg": 90, "profundidad_m": 16.3,
"coord": {"crs": "EPSG:32718", "E": 190306.6, "N": 9029699.5, "msnm": 2325.34, "msnm_instalacion": 2325.34},
}

# Umbrales por sensor (personalizables)
UMBRALES_SENSORES = {
"PE-01": {"verde_max": 1.0, "amarillo_max": 2.0},
"PE-02": {"verde_max": 1.0, "amarillo_max": 2.0},
"PE-03": {"verde_max": 1.0, "amarillo_max": 2.0},
"PE-04": {"verde_max": 1.0, "amarillo_max": 2.0},
"PE-05": {"verde_max": 1.0, "amarillo_max": 2.0},
"PCV-01": {"verde_max": 0.5, "amarillo_max": 1.0},
"PCV-02": {"verde_max": 0.5, "amarillo_max": 1.0},
"PCV-03": {"verde_max": 0.5, "amarillo_max": 1.0},
"PCV-04": {"verde_max": 0.5, "amarillo_max": 1.0},
"PCV-05": {"verde_max": 0.5, "amarillo_max": 1.0},
"PCV-06": {"verde_max": 0.5, "amarillo_max": 1.0},
}

print("SENSORES y UMBRAL_SENSORES listos para Pz-Desk.")
SENSORES y UMBRAL_SENSORES listos para Pz-Desk.
```

3.2.1.2. Dashboard interactivo

Esta celda despliega la herramienta (PzDesk), un dashboard que lee el CSV procesado del sensor (detecta el TAG desde el nombre de archivo), carga sus metadatos desde “SENSORES” (tipo/modelo, serie, cota msnm y coordenadas UTM18S) y presenta un panel interactivo con selector de fechas para filtrar el periodo de análisis. En pantalla se muestran cinco vistas: nivel piezométrico (mH₂O), promedios diarios/mensuales del nivel, cota piezométrica (msnm) con bandas tipo semáforo según los umbrales del sensor, temperatura (°C) y calidad de señal (%), los ejes de tiempo se formatean en español y las leyendas se mantienen homogéneas para lectura técnica. Con los mismos filtros del dashboard, el usuario puede descargar el CSV del rango seleccionado o generar un PDF listo para archivo: portada con identificación y periodo, tabla técnica del sensor (parámetros de conversión incluidos), imagen satelital, resumen numérico del periodo (máximos/mínimos, promedio, rango, tendencia diaria, estado según umbral) y las gráficas de nivel, cota, temperatura, promedios y señal. El resultado asegura consistencia entre lo visualizado y lo exportado, manteniendo el mismo rango temporal, formato y rotulado

Figura 3.9

Vista del dashboard al ejecutar la celda 5, se identifican el TAG del instrumento, el date picker, el resumen de los datos en el periodo establecido, los botones para generar el reporte y descargar los datos procesados en CSV.

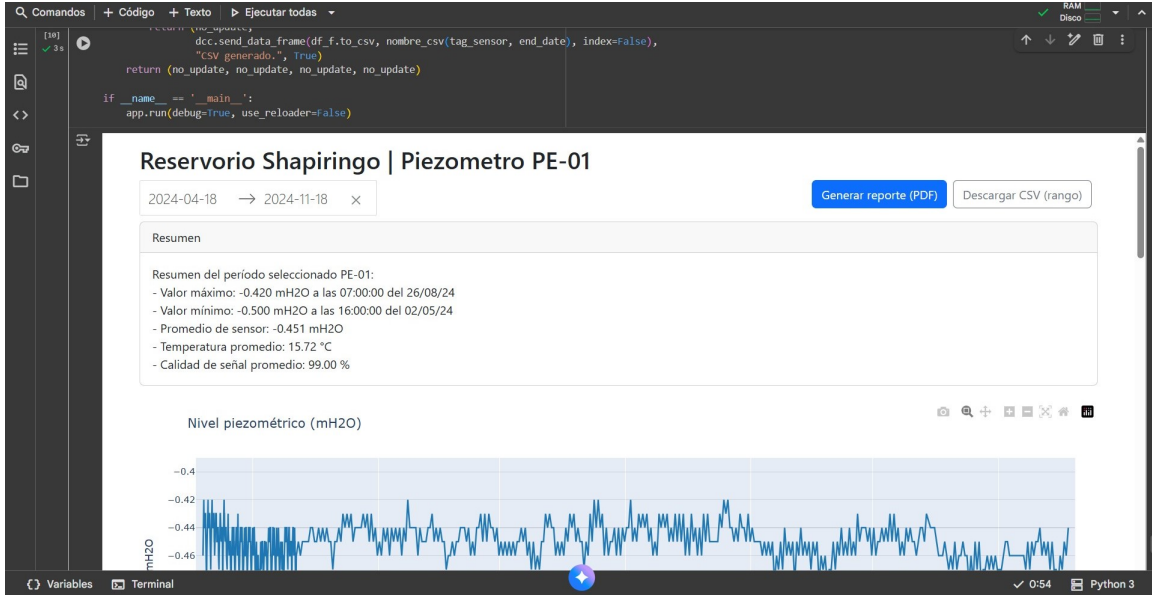


Figura 3.10

Visualización de 'Nivel piezométrico (mH₂O)'

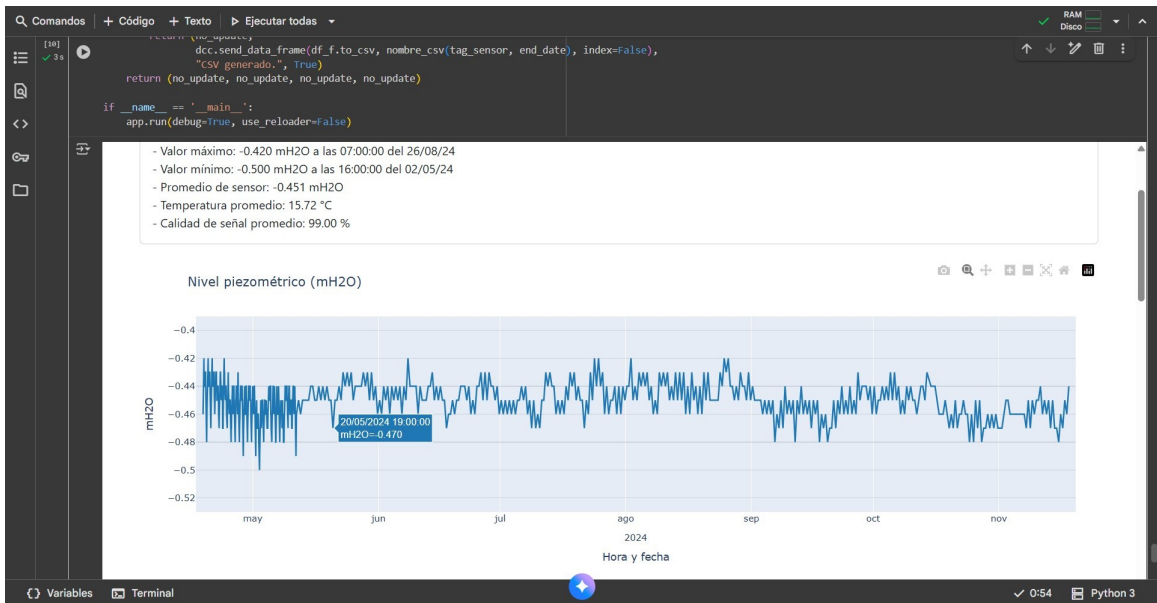


Figura 3.11

Visualización de 'Promedio mensual del nivel (mH₂O)', si elige un periodo que incluye 2 o más meses, caso contrario mostrará un promedio diario.



Figura 3.12

Visualización 'Cota piezométrica (msnm)', se incluye los niveles de alerta sombreados para ubicar el estado de las lecturas registradas.



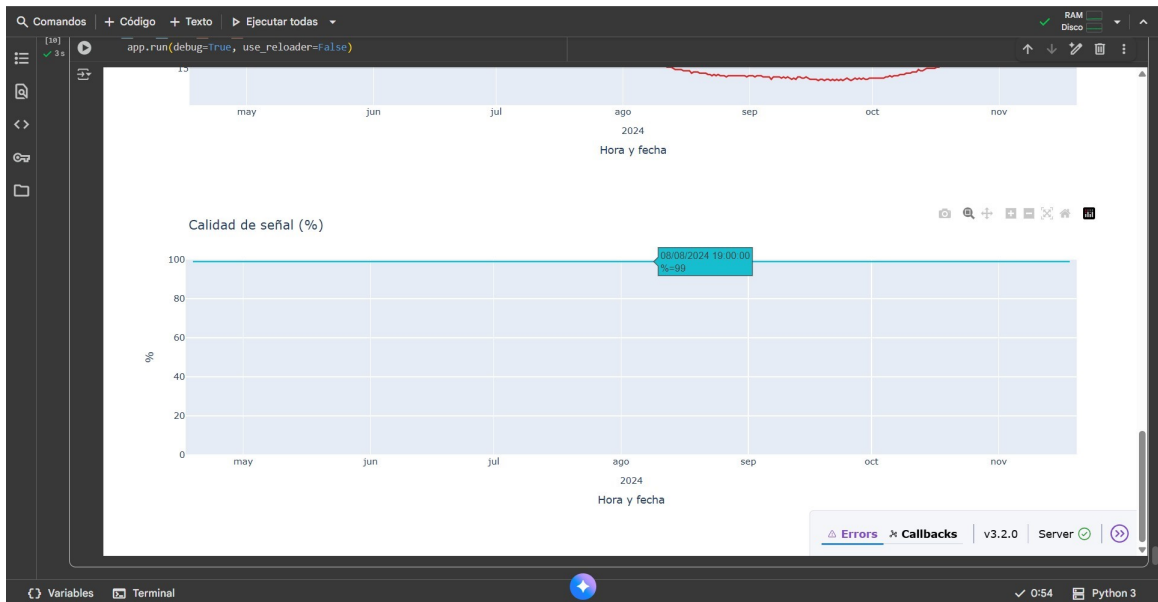
Figura 3.13

Visualización 'Temperatura (°C)' del instrumento.



Figura 3.14

Visualización 'Calidad de señal (%)' del nodo.



3.2.2. Generación de reportes PDF y archivo CSV

La herramienta automatizada desarrollada en Python no solo transforma datos crudos en unidades de ingeniería, sino que también ofrece al usuario una salida clara y estructurada en forma de un informe técnico en PDF y un archivo CSV procesado. Estas salidas permiten archivar, revisar y compartir fácilmente los resultados obtenidos, reforzando la trazabilidad del análisis. A continuación, se describe la estructura del reporte generado y las características del archivo CSV exportado

3.2.2.1. Información del sensor

El informe inicia con una cabecera que identifica el proyecto, el sensor monitoreado (TAG), el rango de fechas analizado y la fecha de generación del reporte. Esta información ubica al lector en el contexto del análisis. Luego, se presenta una tabla con los datos técnicos del sensor: tipo, modelo, fabricante, número de serie, fecha y tipo de instalación, cota de instalación (msnm), coordenadas UTM y parámetros clave como R_O , T_O , G y K. Además, se muestra la fórmula utilizada para la conversión de unidades y los umbrales definidos para clasificar el nivel piezométrico en estados (normal, medio y alto) según cota.

Figura 3.15

Encabezado del reporte e información de un sensor procesado.

Reservorio Shapiringo | Piezómetro PE-01

Periodo: 01/05/2024 00:00:00 – 18/11/2024 07:00:00

Generado: 09/11/25 | By PzDesk

1. Información del sensor

TAG	PE-01
Tipo	Piezómetro de Cuerda Vibrante
Marca	Geokon
Modelo	4500HD – 700kPa
Serial Number	1423222
Fecha de instalación	16/01/2015
Tipo de instalación	Inclinado
Ángulo (°)	45
Profundidad (m)	x
Coordenadas	N=9029779.387 m, E=190351.445 m (UTM 18S)
Cota de instalación (msnm)	2327.800
Umbral usados	Normal ≤ 2328.800 m Medio ≤ 2329.800 m Alto > 2329.800 m
Conversión (MPa)	$P = (R1 - R0) \cdot G + (T1 - T0) \cdot K$; 1 MPa = 101.997 mH2O
Factor G (MPa/digit)	-0.0001793
Factor K (MPa/°C)	-0.0001541
R0 (digits)	9078.9
T0 (°C)	21.3

3.2.2.2. Ubicación del sensor

Se incluye una imagen satelital de alta resolución que ubica visualmente el sensor dentro del reservorio, facilitando la relación entre el dato y el entorno físico. Este mapa, acompañado de las coordenadas UTM, contribuye a una mejor comprensión espacial del monitoreo geotécnico.

Figura 3.16

Ubicación geográfica del piezómetro procesado en el reservorio Shapiringo.



3.2.2.3. Resumen de datos

Este bloque presenta un resumen estadístico clave del periodo analizado: última cota registrada, fechas de máximos y mínimos, valores extremos de nivel piezométrico, desplazamientos diarios, temperatura promedio (con sus extremos) y calidad de señal. También se incluye la clasificación del estado del sensor según los umbrales definidos. Esta síntesis facilita una lectura rápida del comportamiento general del instrumento (Ver Tabla 3.2).

Tabla 3.2

Resumen de datos del sensor procesado

3. Resumen de datos			
Periodo: 01/05/24 – 18/11/24			
Última medición (msnm)	2327.360	Fecha/hora última medición	18/11/2024 07:00:00
Nº de Nivel Máximos	6	Nº de Nivel Mínimos	3
Nivel máx (mH ₂ O)	-0.420	Fecha del último máx	26/08/2024 07:00:00
Nivel mín (mH ₂ O)	-0.500	Fecha del último mín	02/05/2024 16:00:00
Rango mH ₂ O (máx - mín)	0.080	Δ nivel período (mH ₂ O)	0.000
Desplazamiento mH ₂ O / día	0.0000	Desplazamiento mm / día	0.0
Estado (Nivel de Alerta)	Normal	Temperatura promedio (°C)	15.56
Temperatura máx (°C)	16.04	Fecha del último Temp máx	02/05/2024 12:00:00
Temperatura mín (°C)	14.90	Fecha del último Temp mín	25/09/2024 19:00:00
Promedio de señal nodo (%)	99.0	% tiempo ≥ 95%	100.0

3.2.2.4. Gráfico de los datos

Finalmente, el informe muestra cinco gráficos: nivel piezométrico (mH₂O), cota piezométrica (msnm), promedio mensual del nivel, temperatura (°C) y calidad de señal (%). Cada uno incluye ejes rotulados y leyendas claras, empleando escalas técnicas apropiadas. Las bandas de alerta se visualizan en el gráfico de cota, destacando visualmente los posibles estados del sistema. Estos gráficos complementan el resumen técnico y permiten una evaluación visual de la evolución temporal del sensor.

3.2.2.5. Archivo CSV procesado por la herramienta

Además del informe en PDF, la herramienta genera un archivo CSV limpio y listo para ser analizado en otras plataformas. A diferencia del archivo crudo original, que presenta lecturas en Hz, el CSV resultante estandariza los campos y unidades: incluye tiempo, nivel piezométrico en mH₂O, cota en msnm, temperatura en °C, resistencia del termistor (Ohm) y calidad de señal (%). Esta estructura organizada y coherente facilita tanto el procesamiento técnico como su integración con otras herramientas de análisis.

3.3. Aplicación de la herramientas a datos reales del reservorio

El sistema desarrollado fue aplicado a datos reales provenientes de los piezómetros instalados en el reservorio Shapiringo, con el fin de evaluar su comportamiento en un entorno operativo real. La aplicación permitió procesar series temporales extensas, gestionar automáticamente los parámetros asociados a cada instrumento y obtener resultados consistentes, evidenciando la capacidad del sistema para operar con datos reales de monitoreo geotécnico sin intervención manual durante el flujo de procesamiento.

En este contexto, la herramienta automatizada fue aplicada a datos reales provenientes de once archivos CSV exportados desde la gateway Ackcio, correspondientes al periodo comprendido entre el 18/04/2024 y el 18/11/2024. Cada archivo contenía más de 900 registros asociados a piezómetros de cuerda vibrante instalados en el reservorio Shapiringo,

Figura 3.17

Visualización de gráficos del sensor procesado del reporte.

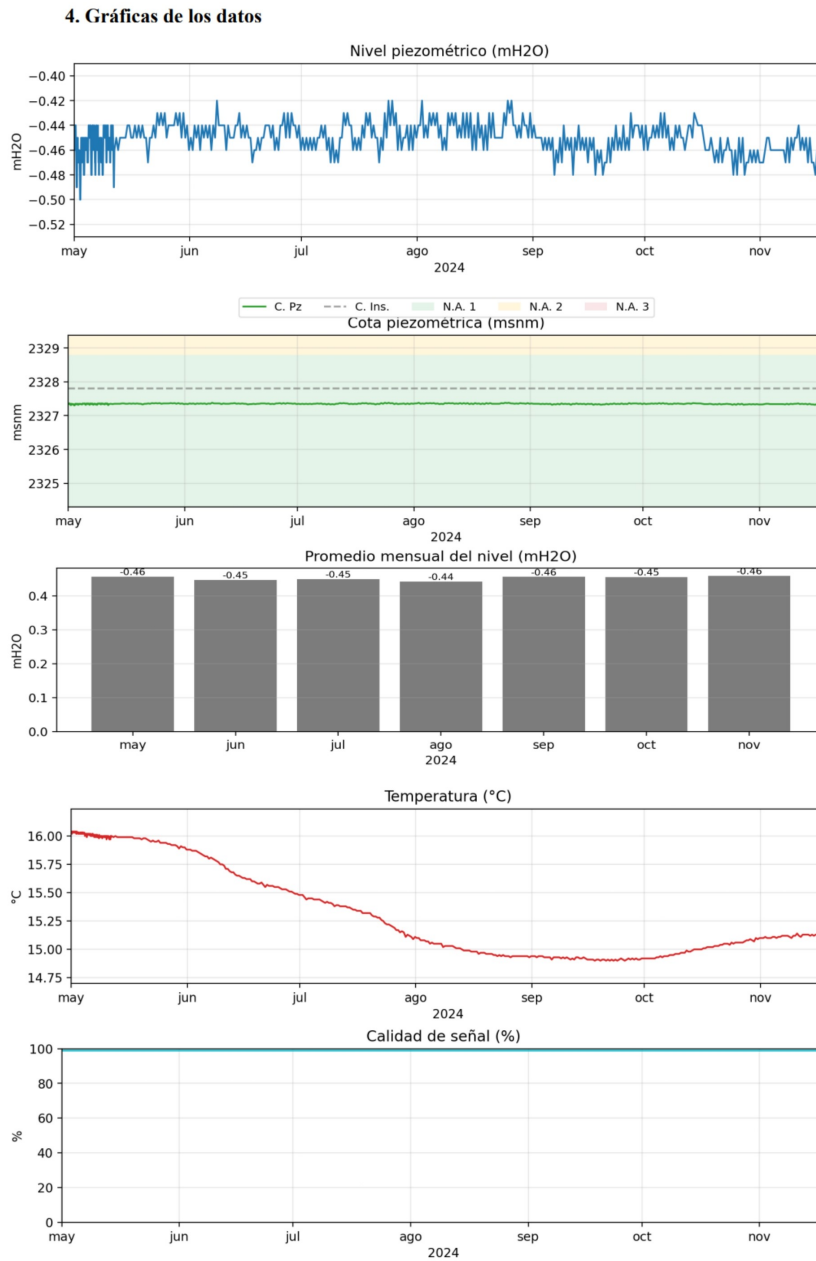
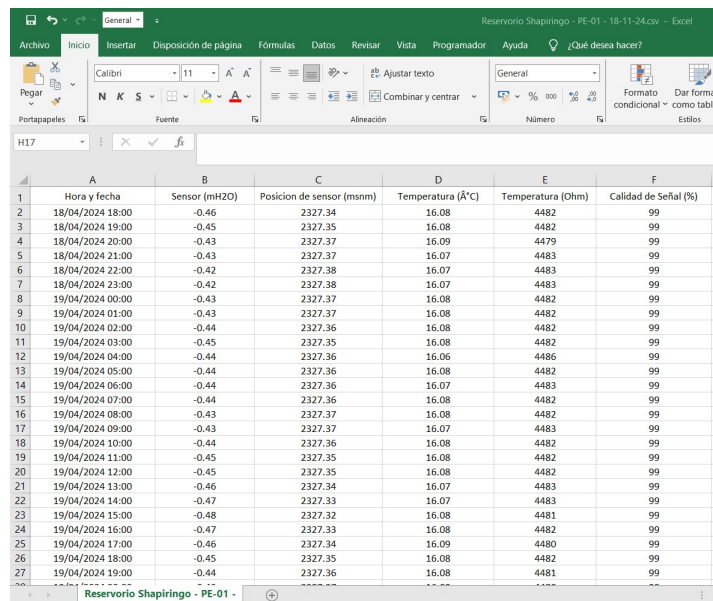


Figura 3.18

Visualización del archivo CSV del sensor procesado.



	A	B	C	D	E	F
	Hora y fecha	Sensor (mHZO)	Posición de sensor (msnm)	Temperatura (°C)	Temperatura (Ohm)	Calidad de Señal (%)
1	18/04/2024 18:00	-0.46	2327.34	16.08	4482	99
2	18/04/2024 19:00	-0.45	2327.35	16.08	4482	99
3	18/04/2024 20:00	-0.43	2327.37	16.09	4479	99
4	18/04/2024 21:00	-0.43	2327.37	16.07	4483	99
5	18/04/2024 22:00	-0.42	2327.38	16.07	4483	99
6	18/04/2024 23:00	-0.42	2327.38	16.07	4483	99
7	18/04/2024 00:00	-0.43	2327.37	16.08	4482	99
8	19/04/2024 01:00	-0.43	2327.37	16.08	4482	99
9	19/04/2024 02:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
10	19/04/2024 03:00	-0.45	2327.35	16.08	4482	99
11	19/04/2024 04:00	-0.44	2327.36	16.06	4486	99
12	19/04/2024 05:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
13	19/04/2024 06:00	-0.44	2327.36	16.07	4483	99
14	19/04/2024 07:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
15	19/04/2024 08:00	-0.43	2327.37	16.08	4482	99
16	19/04/2024 09:00	-0.43	2327.37	16.07	4483	99
17	19/04/2024 10:00	-0.44	2327.36	16.08	4482	99
18	19/04/2024 11:00	-0.45	2327.35	16.08	4482	99
19	19/04/2024 12:00	-0.45	2327.35	16.08	4482	99
20	19/04/2024 13:00	-0.46	2327.34	16.07	4483	99
21	19/04/2024 14:00	-0.47	2327.33	16.07	4483	99
22	19/04/2024 15:00	-0.48	2327.32	16.08	4481	99
23	19/04/2024 16:00	-0.47	2327.33	16.08	4482	99
24	19/04/2024 17:00	-0.46	2327.34	16.09	4480	99
25	19/04/2024 18:00	-0.45	2327.35	16.08	4482	99
26	19/04/2024 19:00	-0.44	2327.36	16.08	4481	99

agrupados en cinco instrumentos del grupo PE y seis del grupo PCV.

Durante el procesamiento, la herramienta identificó automáticamente cada piezómetro a partir del nombre del archivo, asignó los parámetros de conversión correspondientes y generó salidas en unidades de ingeniería, incluyendo nivel piezométrico y cota piezométrica, las cuales fueron posteriormente utilizadas para el análisis y la visualización de resultados.

Del total de 10 063 registros brutos, se excluyeron 71 registros como parte de los controles básicos de calidad implementados, tales como la detección de duplicados, registros sin marca temporal o valores fuera de rango. Como resultado, se obtuvieron 9 992 registros válidos para el análisis, lo que evidencia un comportamiento estable del sistema y su capacidad para gestionar datos reales de monitoreo geotécnico de forma consistente y sin intervención manual.

Tabla 3.3*Resumen de registros crudos y procesados por grupo (PE/PCV)*

Registros	PE	PCV	Total	Diferencia
Brutos	4644	5419	10063	0
Procesados	4644	5348	9992	-71

3.4. Evaluación del desempeño y validación de la herramienta

Para evaluar el desempeño del sistema automatizado, se realizaron análisis orientados a validar la precisión del procesamiento y la aceptación de la solución desarrollada. En esta sección se presentan los resultados del contraste entre el procesamiento automatizado y el cálculo manual, así como la evaluación realizada por especialistas, aportando evidencia sobre la confiabilidad y aplicabilidad del sistema en un contexto técnico-operativo.

3.4.1. Contraste de resultados: Herramienta vs. Excel

Para cada piezómetro se emparejaron las lecturas por fecha-hora y se calculó el relación de Pearson (r) entre los resultados de la herramienta desarrollada en Python y el cálculo manual en Excel para las tres variables: mH_2O , temperatura ($^{\circ}C$) y cota piezométrica (msnm). Los valores de r se reportan con 2 decimales y el criterio de aceptación definido es $r \geq 0.95$ por instrumento y por variable.

La presentación de resultados se organiza en las siguientes dos tablas:

Tabla 3.4*Resultados de r por grupo, PE y PCV, de las series de datos de mH_2O , $^{\circ}C$ y msnm.*

GRUPO	Coficiente r		
	$^{\circ}C$	mH_2O	msnm
PE	1.00	1.00	1.00
PCV	1.00	1.00	1.00

Tabla 3.5

Resultados de r de los 11 instrumentos de las series de datos de mH₂O, °C y msnm.

TAG	Coeficiente r		
	°C	mH ₂ O	msnm
PE-01	1.00	0.98	0.98
PE-02	1.00	0.99	0.99
PE-03	1.00	0.98	0.98
PE-04	1.00	0.99	0.99
PE-05	1.00	0.98	0.98
PCV-01	1.00	1.00	1.00
PCV-02	1.00	0.99	0.99
PCV-03	1.00	1.00	1.00
PCV-04	0.99	0.99	0.99
PCV-05	1.00	0.98	0.98
PCV-06	0.99	0.98	0.98

En los resultados individuales por instrumento, los coeficientes cumplen el umbral de $r \geq 0.95$, variando entre 0.98 y 1.00. En las tablas de grupo, el valor aparece como 1.00 por el mayor rango que se obtiene al concatenar series y por el redondeo a dos decimales, por ello, la evidencia principal de validación es la tabla por instrumento, mientras que el r agrupado se presenta como referencia complementaria. Con este esquema (PE y PCV), la herramienta demuestra alta concordancia con Excel en las tres variables y satisface el criterio cuantitativo establecido ($r \geq 0.95$).

3.4.2. Resultados de cuestionario de juicio experto

Se aplicó el cuestionario a cinco especialistas en instrumentación geotécnica y/o procesamiento de datos de sensores. El instrumento se estructuró en tres secciones:

- **(I) Registro del perfil del evaluador:** Esta sección conformada por 6 preguntas (2 opcionales y 4 obligatorias) recoge información general del evaluador, incluyendo cargo o puesto, años de experiencia, experiencia con instrumentación piezométrica y nivel de familiaridad con el uso de Google Colab, con el fin de contextualizar las respuestas del cuestionario.

- **(II) Evaluación tipo Likert:** Compuesta por 24 ítems se evalúa la herramienta desarrollada mediante una escala tipo Likert de cinco niveles, considerando aspectos relacionados con el procesamiento de datos, aplicación de parámetros de calibración, visualización en el dashboard, generación de reportes PDF y uso del flujo automatizado en Google Colab.
- **(III) Preguntas de mejora:** Esta sección comprende 3 preguntas abiertas orientadas a recoger sugerencias y observaciones de los evaluadores respecto al dashboard, el reporte PDF y la ejecución del flujo de trabajo en Google Colab.

Cada evaluador utilizó la herramienta siguiendo el flujo de procesamiento (carga/mapeo de CSV, conversión, navegación del dashboard y exportación) y respondió el cuestionario en una única sesión. Las respuestas se analizaron como promedio por ítem y promedio global, con criterio de aceptación previamente establecido de media ≥ 4.5 tanto por ítem como en el global.

A continuación, se presentan los resultados de la Sección 1 (perfil) del cuestionario, se omitieron las dos primeras preguntas opcionales de identificación (nombre y área/empresa) en el análisis.

Tabla 3.6

Resultados de la tercera pregunta de la Sección I del cuestionario: Cargo o puesto del evaluador.

N° Evaluador	Cargo/Puesto
1	Ingeniero geólogo
2	Ingeniero Instrumentista Geotécnico
3	Ingeniero de Proyectos
4	Instrumentista Geotécnico Junior
5	Gerente de Operaciones

Figura 3.19

Resultados de la cuarta pregunta de la sección 1 del cuestionario, Años de experiencia del evaluador.

Años de experiencia

5 respuestas

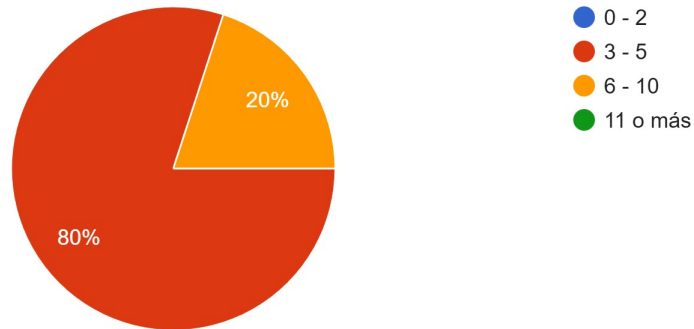


Figura 3.20

Resultados de la quinta pregunta de la sección 1 del cuestionario, Experiencia con piezómetros del evaluador.

Experiencia con piezómetros

5 respuestas

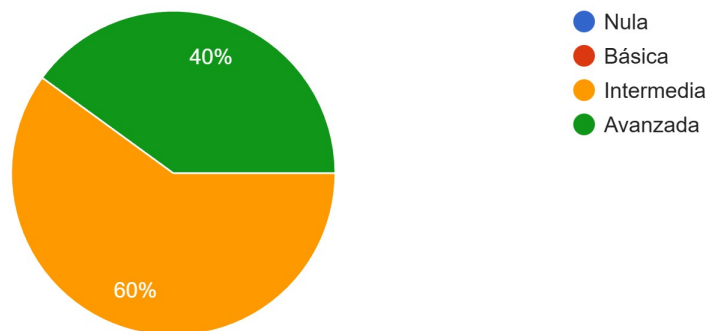
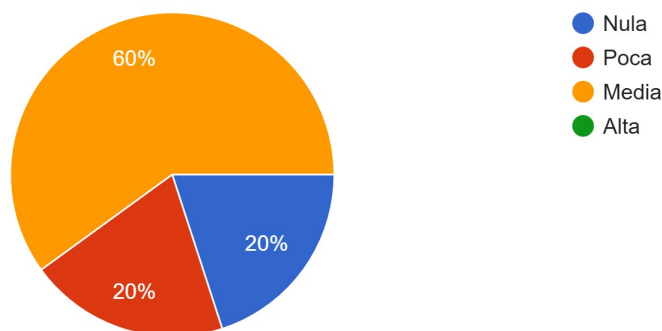


Figura 3.21

Resultados de la quinta pregunta de la sección I del cuestionario, Familiaridad con Google Colab del evaluador.

Familiaridad con Google Colab

5 respuestas



La Tabla 3.7 resume los resultados de la Sección 2 del cuestionario (24 ítems, escala Likert 1–5). Para cada ítem se reportan el número de respuestas y la media (M), al final se presenta el promedio global (media no ponderada de las 24 medias). Conforme al criterio de aceptación ($M \geq 4.5$ por ítem y en el global), todos los ítems cumplen, con valores principalmente entre 4.6 y 4.8 y un promedio global de 4.78.

Tabla 3.7

Resultados de la Sección II del cuestionario Likert: medias por ítem y promedio global

N°	Ítem	Respuestas de la escala					Puntaje	Media
		1	2	3	4	5		
1	¿Pude cargar/usar los CSV y el sistema los reconoció sin errores?				1	4	24	4.8

Continúa en la siguiente página

N°	Ítem	Respuestas de la escala					Puntaje	Media
		1	2	3	4	5		
2	¿El mapeo del archivo al TAG del piezómetro es correcto y visible?				1	4	24	4.8
3	¿Los parámetros (G, K, R ₀ , T ₀ , cota) se aplican de forma explícita y trazable?				1	4	24	4.8
4	¿El CSV procesado mantiene nombres de columnas, unidades y formato de fecha consistentes?				1	4	24	4.8
5	¿La conversión a mH ₂ O y msnm es coherente con la práctica del sitio?				1	4	24	4.8
6	¿En dashboard y PDF, las unidades en ejes y tablas están claramente indicadas?				1	4	24	4.8
7	¿Las coordenadas ubican correctamente el sensor en la imagen satelital?				1	4	24	4.8
8	¿El selector de fechas filtra correctamente todas las vistas?				1	4	24	4.8
9	Las gráficas (nivel, cota, temperatura, señal) ¿son legibles y útiles para análisis?				1	4	24	4.8

Continúa en la siguiente página

N°	Ítem	Respuestas de la escala					Puntaje	Media
		1	2	3	4	5		
10	¿Los umbrales tipo semáforo ayudan a interpretar el estado sin ambigüedad?				1	4	24	4.8
11	¿El resumen del período (máx/mín, promedio, tendencia) aporta valor técnico?				1	4	24	4.8
12	¿La Sección 1 – Información del sensor describe adecuadamente el instrumento (TAG, modelo/serie, parámetros, coordenadas y cota)?				1	4	24	4.8
13	¿La imagen satelital y las gráficas están bien rotuladas (títulos, unidades, periodo)?				1	4	24	4.8
14	¿El resumen tabular (máx/mín, rango, cambio/día) es claro y suficiente?				1	4	24	4.8
15	¿La descarga de CSV respeta el rango temporal seleccionado?				1	4	24	4.8
16	¿El PDF reproduce lo visto en el dashboard (mismo periodo/figuras)?				1	4	24	4.8

Continúa en la siguiente página

N°	Ítem	Respuestas de la escala					Puntaje	Media
		1	2	3	4	5		
17	¿Globalmente, la herramienta reduce el tiempo de análisis vs. flujo manual?			1		4	23	4.6
18	¿Considero que el sistema es aplicable para el seguimiento operativo?				1	4	24	4.8
19	¿Pude abrir el cuaderno en Colab y ejecutar las celdas sin errores?				1	4	24	4.8
20	¿Entendí qué celda ejecutar en cada paso (ingesta → mapeo → conversión → exportes)?				1	4	24	4.8
21	¿El manejo de archivos (subir CSV / descargar CSV o PDF) fue claro?				1	4	24	4.8
22	¿Los mensajes de salida me orientaron cuando faltaba algún dato, parámetro o secuencia de ejecución?			1		4	23	4.6
23	¿El tiempo de ejecución fue razonable para mi equipo/red?				1	4	24	4.8
24	¿Me sentiría cómodo repitiendo el flujo en Colab sin asistencia?			1		4	23	4.6
Promedio global							4.78	

Para cerrar los resultados cualitativos, en la Sección III del cuestionario, las respuestas abiertas confirman una aceptación general del flujo actual (dashboard, reporte y Colab) y orientan mejoras puntuales. En el dashboard, se sugiere reducir clics/pasos y habilitar alertas automáticas cuando se excedan umbrales. En el reporte PDF, los expertos proponen incorporar una sección de “Cambios desde el último reporte/Novedades”, así como autoría y datos de la empresa/cliente para fortalecer la trazabilidad. En Colab, recomiendan añadir un índice/esquema inicial con enlaces (Configuración, Carga, Procesamiento y Resultados) que agilice la navegación. También hubo respuestas neutras (“sin comentarios”, “todo bien”), lo que refuerza la percepción de suficiencia funcional del prototipo en su estado actual.

En conjunto, el juicio experto respalda la utilidad, claridad y aplicabilidad de la herramienta, coherente con los resultados cuantitativos y el umbral de aceptación definido para la encuesta. Dado el tamaño muestral acotado ($n = 5$), estas observaciones se interpretan como una validación piloto con mejoras incrementales de fácil implementación: (I) atajos/automatización de pasos, (II) módulo de notificaciones por umbrales, (III) ficha de contexto en el PDF, y (IV) portada/índice guiado en Colab. Con ello, la evidencia cualitativa no modifica las conclusiones principales y orienta la priorización de ajustes para la siguiente versión.

Capítulo IV: Discusión

Los resultados obtenidos demuestran que la automatización del procesamiento de datos de piezómetros mediante una herramienta desarrollada en Python constituye una solución técnica eficaz para la conversión de unidades brutas a unidades de ingeniería y para la mejora de la visualización e interpretación de la información geotécnica del reservorio Shapiringo. Estos hallazgos se encuentran alineados con los objetivos planteados y con los fundamentos teóricos de la instrumentación geotécnica y la automatización de procesos.

El funcionamiento del sistema automatizado evidenció una ejecución correcta y consistente del flujo completo de procesamiento, desde la ingesta de archivos CSV crudos generados por la gateway Ackcio hasta la obtención de salidas estandarizadas en unidades de ingeniería (mH₂O, msnm y °C). La identificación automática del TAG del piezómetro y la aplicación de los parámetros de calibración e instalación (G, K, R₀, T₀ y cota) garantizan la trazabilidad técnica de los cálculos, aspecto señalado como crítico en estudios previos sobre instrumentación geotécnica para asegurar la confiabilidad de los datos procesados.

La validación cuantitativa mostró una alta concordancia entre los resultados obtenidos mediante la herramienta automatizada y el cálculo manual realizado en Microsoft Excel, con coeficientes de correlación de Pearson entre 0.98 y 1.00 para las variables evaluadas en los once piezómetros analizados. Estos valores superan ampliamente el umbral establecido ($r \geq 0,95$), confirmando que el procesamiento automatizado reproduce con precisión el método manual. Este resultado es coherente con lo reportado por (Yogatama & Tirta, 2021), quienes destacan el uso de Python como una alternativa confiable para la automatización de cálculos técnicos sin pérdida de exactitud.

Desde el punto de vista operativo, la automatización permitió reducir significativamente el tiempo de procesamiento frente al flujo manual tradicional en Excel, especialmente considerando el volumen de datos analizado, superior a 9 900 registros válidos. Asimismo, la eliminación de tareas repetitivas disminuye la probabilidad de errores humanos asociados a la manipulación manual de datos, tal como lo señala (Cerdeza Salazar, 2022) en estudios

sobre sistemas de monitoreo geotécnico.

La incorporación de un dashboard interactivo y la generación de reportes técnicos en PDF aportan un valor adicional al sistema automatizado, al facilitar la interpretación técnica mediante visualizaciones claras y el uso de umbrales de alerta. Finalmente, los resultados del juicio experto, con un promedio global de 4.78/5, evidencian una alta aceptación de la herramienta en términos de utilidad y aplicabilidad operativa, confirmando la viabilidad técnica de la solución propuesta.

Conclusiones y Recomendaciones

Conclusiones

Se diseñó e implementó una herramienta capaz de importar y procesar datos brutos provenientes de archivos CSV generados por la gateway Ackcio. El sistema identifica automáticamente cada piezómetro y aplica los parámetros de calibración e instalación, garantizando la correcta conversión a unidades de ingeniería conforme a las especificaciones del fabricante.

Se desarrolló un sistema de visualización que integra un dashboard interactivo y la generación automática de archivos CSV y reportes técnicos en formato PDF. Estas funcionalidades permiten analizar de manera clara y ordenada variables piezométricas relevantes, fortaleciendo la interpretación de resultados y la comunicación técnica para actividades de monitoreo y toma de decisiones.

La herramienta fue aplicada a datos reales de once piezómetros instalados en el reservorio Shapiringo, procesando más de nueve mil registros válidos. El sistema demostró estabilidad operativa, capacidad para manejar grandes volúmenes de datos y mecanismos automáticos de depuración, confirmando su aplicabilidad en un entorno real de monitoreo geotécnico.

La validación cuantitativa evidenció una alta concordancia entre el procesamiento automatizado y el cálculo manual en Excel, con coeficientes de correlación superiores a 0.95. De forma complementaria, el juicio de expertos mostró una elevada aceptación, confirmando la viabilidad técnica y metodológica de la solución automatizada propuesta.

La investigación cumplió el objetivo general al desarrollar una herramienta automatizada en Python para el procesamiento de datos de piezómetros de cuerda vibrante, permitiendo convertir de forma confiable las unidades brutas a unidades de ingeniería y optimizar la visualización e interpretación de la información geotécnica del reservorio Shapiringo, mediante un flujo reproducible y técnicamente trazable.

Recomendaciones

Se recomienda incorporar un módulo de alertas automáticas basado en los umbrales definidos para cada piezómetro, de modo que el sistema notifique oportunamente cuando las lecturas superen niveles referenciales. Esta funcionalidad permitiría fortalecer el enfoque preventivo del monitoreo geotécnico y apoyar la toma de decisiones tempranas ante posibles condiciones anómalas en el reservorio.

Asimismo, se sugiere optimizar la interacción del usuario con la herramienta automatizada, reduciendo la cantidad de pasos necesarios para ejecutar el flujo completo de procesamiento en el entorno Google Colab. La incorporación de un esquema guiado o un índice inicial contribuiría a mejorar la usabilidad, especialmente para usuarios con experiencia limitada en programación.

Para futuras investigaciones, se sugiere ampliar el periodo de análisis y el número de especialistas participantes en la validación cualitativa, con el fin de fortalecer la robustez estadística de los resultados. Asimismo, se recomienda evaluar la escalabilidad de la herramienta para integrar otros tipos de instrumentación geotécnica en proyectos de monitoreo hidrológico y geotécnico.

Limitaciones y Futuras Líneas de Investigación

La presente investigación presenta algunas limitaciones que deben ser consideradas al interpretar los resultados obtenidos. En primer lugar, el análisis se realizó sobre un conjunto de datos correspondiente a un periodo específico y a once piezómetros instalados en el reservorio Shapiringo, por lo que los resultados representan el desempeño de la herramienta bajo condiciones operativas particulares. Asimismo, la validación cuantitativa se basó en la comparación con el cálculo manual en Microsoft Excel, el cual, si bien es ampliamente utilizado como referencia en entornos técnicos, no constituye un método de verificación independiente de tipo metrológico. Adicionalmente, en su versión actual, la herramienta está diseñada para procesar y generar reportes a partir de un archivo CSV por instrumento, en caso de cargar múltiples archivos simultáneamente, el sistema ejecuta el

procesamiento únicamente sobre el primer archivo reconocido.

A partir de estas limitaciones, se identifican diversas líneas para futuras investigaciones. Se recomienda ampliar el periodo de análisis y la cantidad de instrumentos evaluados, incorporando datos de otros proyectos o reservorios, con el fin de analizar el desempeño del sistema en distintos contextos geotécnicos. Asimismo, futuras investigaciones podrían implementar la carga y el procesamiento simultáneo de múltiples archivos, integrando reportes consolidados por campaña o periodo de monitoreo. Finalmente, se sugiere extender la herramienta para el procesamiento automatizado de otros tipos de instrumentación geotécnica, así como su integración con bases de datos y plataformas de monitoreo continuo.

Bibliografía

- Ackcio. (2025a). *Ackcio Nodes* [Ackcio]. <https://www.ackcio.com/products/nodes/>
- Ackcio. (2025b). *Ackcio Vibrating Wire Nodes* [Ackcio]. <https://www.ackcio.com/products/nodes/vibrating/>
- Álvarez, R. M., Ordóñez, C. A., & Parra, J. C. (2023). *Estado del arte de la instrumentación geotécnica en presas* [Unimar]. <https://libros.umariana.edu.co/index.php/editorialunimar/catalog/view/208/538/1658>
- BlogLemu. (2013). *Minería en EEUU: El impresionante deslizamiento de tierras de la mina de cobre de Bingham Canyon* [Minería en EEUU]. <https://bloglemu.blogspot.com/2013/04/mineria-en-eeuu-el-impresionante.html>
- Brandão, H., Santos, T., Oliveira, C., & Costa, A. (2023, 17 de octubre). *Application of machine learning techniques on outlier detection of piezometer data*. <https://www.pimentadeavila.com.br/application-of-machine-learning-techniques-on-outlier-detection-of-piezometer-data/>
- Cabrera, P. C., & Sanabria, J. S. (2015). Instrumentación geotécnica para monitorear el nivel freático y calidad del agua con sensores eléctricos en piezómetros de tubo abierto. *Universidad Ricardo Palma*, 183. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/2250>
- Carita, J. P. Q., & Vilcapaza, E. M. (2022). Implementación de Control y Monitoreo Geotécnico en Taludes de Tajo Abierto, Caso Práctico. *Universidad Nacional del Altiplano de Puno*, 85. https://www.researchgate.net/profile/Milton-Mamani-Roque/publication/362316703_Control_Geotecnico_en_Mineria_a_Tajo_Abierto/links/62e2d1317782323cf1823416/Control-Geotecnico-en-Mineria-a-Tajo-Abierto.pdf
- Cerda Salazar, V. I. (2022). Propuesta de monitoreo geotécnico avanzado para depósitos de relaves. *Universidad de Chile*, 126. <https://doi.org/10.58011/kv75-7m17>
- Cisneros Valencia, H. O. (2020). Investigación geotécnica e instrumentación para el diseño de construcción e instalación de piezómetros y pozos de drenaje en la mina Pierina

- año 2019. *Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo*. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/renati/1227861>
- García De la Cruz, J. C. (2025). Implementación de piezómetros Casagrande para mejoramiento de planificación monitoreo y gestión de recursos hídricos en la Unidad Minera Yauricocha. *Universidad Nacional del Centro del Perú*, 105. <http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/12526>
- GEOKON. (2026). Modelo Serie 4500 Piezómetro de cuerda vibrante. *Geokon*, 37. https://www.geokon.com/content/manuals/4500_Manual_de_Instrucciones.pdf
- Geosense. (2020). *VW Piezometer VWP-3000 series*. <https://www.geosense.com/wp-content/uploads/2021/04/VW-Piezometer-VWP-3000-Manual-V1.12.pdf>
- Granados Alegría, V. (2009). Procesamiento y presentación de datos de instrumentación de la presa del P.H. Pirrís. *Instituto Tecnológico de Costa Rica*, 98. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6125>
- Instruments, S. (2020). *Standard Vibrating Wire Piezometer*. <https://www.soilinstruments.com/wp-content/uploads/2020/12/Man106-Vibrating-Wire-Piezometer-Standard-MN1114-Rev1.4.1.pdf>
- Krantz, T., & Jonker, A. (2025, 11 de marzo). *¿Qué es el procesamiento de datos?* [IBM]. <https://www.ibm.com/es-es/think/topics/data-processing>
- McKinney, W. (2022). *Python for Data Analysis, 3E* [O'REILLY]. <https://wesmckinney.com/book/>
- Morera de la Vall González, G. (2016, julio). *Instrumentación y monitorización geotécnica del nuevo túnel “El Melón”* [Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía]. <https://oa.upm.es/42989/>
- NCYT. (2014, 5 de febrero). *Terremotos provocados por un colosal desprendimiento de tierras en una mina*. [Noticias de la Ciencia y la Tecnología NCYT]. <https://noticiasdelaciencia.com/art/9491/terremotos-provocados-por-un-colosal-desprendimiento-de-tierras-en-una-mina>

Yogatama, B., & Tirta, B. (2021). Python Application I Geotechnical Engineering Practices. *ResearchGate*, 10. https://www.researchgate.net/publication/349052721_Python_Application_I_Geotechnical_Engineering_Practices