

UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



Tesis

Desarrollo y aplicación de un microcontrolador para medir la humedad del suelo in situ con el sensor HW-080 en comparación con los métodos al HORNO Y SPEEDY APURÍMAC,
2025

Presentado por:

Rolo Huamani Molina

Para optar el título de Ingeniero Civil

Abancay, Perú

2026



UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS DE APURÍMAC
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

**Desarrollo y aplicación de un microcontrolador para medir la humedad del suelo in situ
con el sensor HW-080 en comparación con los métodos al HORNO Y SPEEDY
APURÍMAC, 2025**

Presentado por **Rolo Huamani Molina**, para optar el título de Ingeniero Civil

Sustentado y aprobado el 12 de agosto del 2026 ante el jurado evaluador:

Presidente:

Dr. James Velazque Rojas

Primer miembro:

Mtro. Juan Franks Valenzuela Carrasco

Segundo miembro:

Ing. Julio Abarca Portillo

Asesores:

Mg. Jinner Bravo Apaza

Ing. Edison Ponce Torres



Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia

CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD N° 286-2026

La Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, a través de la Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería declara que, la Tesis titulada: **Desarrollo y aplicación de un microcontrolador para medir la humedad del suelo in situ con el sensor HW-080 en comparación con los métodos al HORNO Y SPEEDY APURÍMAC, 2025**, presentado por el bachiller; **Rolo Huamani Molina**, para optar el Título de **Ingeniero Civil**; ha sido sometido a un mecanismo de evaluación y verificación de similitud, a través del Software Turnitin, siendo el índice de similitud **ACEPTABLE** de **(12%)** por lo que, cumple con los criterios de originalidad establecidos por la Universidad.

Abancay, 29 de setiembre del 2026

Atentamente,


UNIVERSIDAD NACIONAL MICAELA BASTIDAS
FACULTAD DE INGENIERÍA
Dr. Wolfgang Calsin
DIRECTOR DE LA UNIDAD DE INVESTIGACIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA

C. c.
Archivo
WHC/ DUI-FI
Yovana/sec
REG. N° 1011

Agradecimiento

Expreso mi más profundo agradecimiento a la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac por brindarme la formación, las herramientas y el espacio académico necesarios para el desarrollo de la presente tesis, así como por el financiamiento parcial otorgado para la ejecución del presente proyecto; así mismo agradezco de manera especial a los docentes y al personal académico por su orientación, apoyo constante y compromiso con mi formación profesional; de igual modo también manifiesto mi sincero agradecimiento a mis padres (Inocencio y Beatriz Molina), por su amor incondicional, sus sacrificios y su confianza permanente en mí, incluso en los momentos más difíciles; y a mis hermanos, por su compañía, paciencia y por ser un apoyo emocional constante a lo largo de este proceso, cuya presencia, comprensión y aliento fueron fundamentales para culminar esta importante etapa de mi vida profesional.

Rolo Huamani Molina



Dedicatoria

Dedico este trabajo en primer lugar, a mis padres (Inocencio Huamani y Beatriz Molina) por su amor incondicional, esfuerzo y sacrificio constante, que han sido el pilar fundamental en cada etapa de mi formación, a mis hermanos, por su apoyo, aliento permanente y compañía a lo largo de este camino; y a la Universidad, por brindarme la oportunidad de crecer académica, profesional y personalmente, contribuyendo de manera significativa a la consolidación de mis metas y aspiraciones.

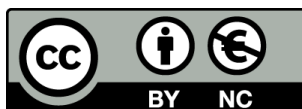
Rolo Huamani Molina



Desarrollo y aplicación de un microcontrolador para medir la humedad del suelo in situ con el sensor HW-080 en comparación con los métodos al HORNO Y SPEEDY APURIMÁC, 2025

Línea de investigación: Ingeniería de la construcción

Esta publicación está bajo una Licencia Creative Commons



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
RESUMEN	4
ABSTRACT	6
CAPÍTULO I	8
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	8
1.1 Descripción del problema	8
1.2 Enunciado del problema	10
1.2.1 Problema general	10
1.2.2 Problemas específicos	10
1.3 Justificación de la investigación	11
1.4 Ubicación y contextualización	14
CAPÍTULO II	15
OBJETIVOS E HIPÓTESIS	15
2.1 Objetivos de la investigación	15
2.1.1 Objetivo general	15
2.1.2 Objetivos específicos	15
2.2 Hipótesis de la investigación	16
2.2.1 Hipótesis general	16
2.2.2 Hipótesis específicas	16
2.3 Operacionalización de variables	16
CAPÍTULO III	18
MARCO TEÓRICO REFERENCIAL	18
3.1 Antecedentes	18
3.1.1 Antecedentes internacionales	18
3.1.2 Antecedentes nacionales	26
3.2 Marco teórico	29
3.2.1 Contenido de humedad del suelo	29
3.2.2 Condiciones geotécnicas	30
3.2.3 Métodos de medición del contenido de humedad del suelo	31
3.2.4 Suelo	35
3.2.5 Contenido de humedad - ASTM D2216	37
3.2.6 Límites de Atterberg	39



3.2.7	Análisis granulométrico	40
3.2.8	Sistema de clasificación de suelos	43
3.2.9	Método Speedy (ASTM D4944)	46
3.2.9.1	Equipo necesario	48
3.2.9.2	Preparación de la muestra	48
3.2.9.3	Proceso de reacción	49
3.2.9.4	Lectura del manómetro	49
3.2.9.5	Calibración	49
3.2.10	Método al horno (ASTM D2216)	50
3.2.11	Sistema basado en Arduino para medición del contenido de humedad del suelo	52
3.2.11.1	Características principales	55
3.2.11.2	Funcionamiento de un microcontrolador Arduino	55
3.2.11.3	Componentes principales de un microprocesador Arduino	56
3.2.12	Sensor HW-080	57
3.2.12.1	Características del sensor HW-080	57
3.3	Marco conceptual	59
CAPÍTULO IV		62
METODOLOGÍA		62
4.1	Tipo y nivel de investigación	62
4.2	Diseño de la investigación	63
4.3	Descripción ética de la investigación	64
4.4	Población y muestra	64
4.5	Procedimiento	66
4.6	Técnicas e instrumentos	70
4.7	Análisis estadístico	70
CAPÍTULO V		72
RESULTADOS Y DISCUSIONES		72
5.1	Análisis de resultados	72
5.2	Contrastación de hipótesis	89
5.3	Discusión	92
CAPÍTULO VI		96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		96
6.1	Conclusiones	96
6.2	Recomendaciones	98
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		100
ANEXOS		107

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 — Operacionalización de variables	17
Tabla 2 — Principales ensayos para conocer las propiedades del suelo	35
Tabla 3 — Cálculo del contenido de humedad	37
Tabla 4 — Métodos para determinar el contenido de humedad	38
Tabla 5 — Tamices para el análisis granulométrico	41
Tabla 6 — Grupos de clasificación AASHTO	43
Tabla 7 — Grupos de clasificación USCS	44
Tabla 8 — Estadísticos descriptivos globales del contenido de humedad	72
Tabla 9 — Correlaciones entre los métodos de referencia	78
Tabla 10 — Correlaciones en parejas de Pearson para los métodos de referencia	78
Tabla 11 — Resumen del modelo de regresión para el sensor HW-080	79
Tabla 12 — Estadísticas descriptivas de Arduino y horno	80
Tabla 13 — Estimación de la diferencia pareada	81
Tabla 14 — Prueba t para muestras relacionadas	81
Tabla 15 — Estadísticas descriptivas de Arduino y Speedy	83
Tabla 16 — Estimación de la diferencia pareada	83
Tabla 17 — Prueba t para muestras de Arduino y Speedy	84
Tabla 18 — Precisión y variabilidad de las mediciones de humedad	86
Tabla 19 — Sesgo del Arduino HW-080 respecto a los métodos de referencia	87
Tabla 20 — Capacidad de estimación del Arduino con sensor HW-080	88
Tabla 21 — Matriz de consistencia	108

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 — Mapa de localización del desarrollo del estudio	14
Figura 2 — Fases del suelo	36
Figura 3 — Relación de vacíos y contenido de humedad por tipo de suelo	37
Figura 4 — Contenido de humedad	38
Figura 5 — Límites de Atterberg	39
Figura 6 — Gráfica de plasticidad	40
Figura 7 — Curva de distribución de tamaño de partícula	42
Figura 8 — Límites de separación por granulometría	42
Figura 9 — Grupos de clasificación SUCS	44
Figura 10 — Grupos de clasificación AASHTO	45
Figura 11 — Medidor de humedad tipo Speedy	48
Figura 12 — Microcontrolador Arduino	55
Figura 13 — Sensor HW-080	57
Figura 14 — Diagrama del sistema Arduino	69
Figura 15 — Histograma de la humedad por el método al horno	74
Figura 16 — Histograma de la humedad método Speedy	74
Figura 17 — Histograma de la humedad método sensor HW – 080 (Arduino)	75
Figura 18 — Gráfica de normalidad de la humedad por el método al horno	76
Figura 19 — Gráfica de normalidad para la humedad por el método Speedy	77
Figura 20 — Gráfica de normalidad de la humedad por el método de sensor HW-080	77
Figura 21 — Gráfica de histograma de diferencias entre el sensor HW-080 y al horno	82
Figura 22 — Gráfica de histograma de diferencias entre el sensor HW-080 y Speedy	85
Figura 23 — Del proceso de construcción del nuevo sensor HW-080	111
Figura 24 — Medición de humedad del suelo	112
Figura 25 — De la aplicación en campo del sensor HW-080	113
Figura 26 — De la determinación de humedad del suelo	114
Figura 27 — De la aplicación en campo del sensor HW-080	115
Figura 28 — Cálculo del contenido de humedad del suelo en C-1	116
Figura 29 — Cálculo de la curva granulométrica	117
Figura 30 — Cálculo del límite líquido	118
Figura 31 — Resultados de C-1 con el sensor HW-080	119
Figura 32 — Contenido de humedad de C-2	120
Figura 33 — Curva granulométrica de C-2	121

Figura 34 — Cálculo del límite líquido de C-2	122
Figura 35 — Resultados de C-2	123
Figura 36 — Contenido de humedad C-3	124
Figura 37 — Curva granulométrica C-3	125
Figura 38 — Límite líquido de C-3	126
Figura 39 — Resultados de C-3	127
Figura 40 — Contenido de humedad de C-4	128
Figura 41 — Curva granulométrica C-4	129
Figura 42 — Límite líquido de C-4	130
Figura 43 — Resultados de C-4	131

INTRODUCCIÓN

El contenido de humedad del suelo constituye uno de los parámetros más relevantes en la ingeniería geotécnica, debido a que influye directamente en el comportamiento físico y mecánico de los suelos. Su determinación resulta fundamental para evaluar propiedades como la consistencia, la compactación, la resistencia al corte, la capacidad portante y la deformabilidad, aspectos que condicionan el desempeño de las obras civiles. En este sentido, las variaciones en el contenido de agua del suelo pueden modificar significativamente su respuesta ante cargas externas y cambios ambientales, afectando la estabilidad y seguridad de infraestructuras tales como pavimentos, cimentaciones, muros de contención, terraplenes y otras estructuras vinculadas al terreno.

En el ámbito de la construcción y del control geotécnico, la medición de la humedad del suelo es una actividad permanente, tanto en etapas de diseño como de ejecución y supervisión de obras. Tradicionalmente, esta determinación se ha realizado mediante métodos convencionales, entre los que destaca el método Speedy, ampliamente utilizado por su rapidez en comparación con el método gravimétrico de laboratorio. No obstante, aunque este procedimiento ha demostrado ser útil en trabajos de campo, presenta ciertas limitaciones relacionadas con el uso de reactivos químicos, la manipulación del equipo, los costos operativos y las condiciones de seguridad requeridas para su aplicación. Estas restricciones pueden dificultar su utilización continua y masiva, especialmente en contextos donde se requiere contar con herramientas de medición más simples, portátiles, económicas y de fácil acceso.

Frente a esta problemática, el avance de las tecnologías electrónicas y de automatización ha permitido el desarrollo de alternativas orientadas a la medición rápida de variables físicas mediante sistemas embebidos y sensores de bajo costo. En este marco, las plataformas basadas en microcontroladores, como Arduino, han cobrado importancia en distintas áreas de la ingeniería debido a su versatilidad, accesibilidad y facilidad de programación. Su incorporación en procesos de monitoreo y adquisición de datos abre nuevas posibilidades para el diseño de instrumentos prácticos que puedan ser implementados en campo con menor complejidad operativa y menor inversión económica. En particular, el uso del sensor HW-080 integrado a



un sistema Arduino representa una opción tecnológica prometedora para estimar el contenido de humedad del suelo de manera inmediata e in situ.

A partir de ello, la presente investigación propone el desarrollo y la aplicación de un sistema basado en microcontrolador Arduino, empleando el sensor HW-080, para la medición del contenido de humedad del suelo en campo, con el propósito de comparar su desempeño frente al método tradicional Speedy. La intención principal es evaluar su viabilidad como alternativa tecnológica para la ingeniería civil, considerando no solo la capacidad de medición, sino también aspectos relacionados con su accesibilidad, practicidad y potencial de implementación en actividades geotécnicas de rutina. De esta manera, el estudio busca aportar evidencia sobre el uso de herramientas tecnológicas de bajo costo en la determinación de parámetros fundamentales del suelo.

La importancia de esta investigación radica en que plantea una respuesta concreta a la necesidad de contar con métodos de medición más económicos, rápidos y funcionales para condiciones de campo, sin perder de vista la confiabilidad de los resultados. En contextos donde los recursos técnicos y económicos son limitados, disponer de sistemas alternativos de medición puede representar una ventaja significativa para la toma de decisiones en proyectos de ingeniería civil. Asimismo, el estudio contribuye al fortalecimiento de la aplicación de tecnologías abiertas en el ámbito académico y profesional, promoviendo la innovación en procedimientos tradicionalmente dependientes de equipos convencionales de mayor costo o complejidad.

En cuanto a la estructura del trabajo, la tesis se organiza en seis capítulos. En el Capítulo I se desarrolla el planteamiento del problema, donde se exponen las limitaciones de los métodos actuales de medición de humedad del suelo y la necesidad de implementar soluciones tecnológicas más accesibles para el trabajo de campo. En el Capítulo II se presentan los objetivos, las hipótesis y las variables de investigación que orientan el desarrollo del estudio. En el Capítulo III se expone el marco teórico y los antecedentes, abordando los fundamentos relacionados con el contenido de humedad del suelo, los métodos de medición convencionales y el uso de tecnologías basadas en microcontroladores y sensores. En el Capítulo IV se describe la metodología, detallando el diseño de la investigación, el desarrollo del sistema propuesto, los procedimientos experimentales y el proceso de comparación con el método Speedy.



Finalmente, en el Capítulo V se presentan los resultados obtenidos, su análisis y discusión, en el capítulo VI se presenta conclusiones y recomendaciones destacando las principales diferencias, ventajas, limitaciones y alcances del sistema desarrollado.

La investigación también tiene como finalidad contribuir al desarrollo de soluciones tecnológicas aplicadas a la ingeniería civil, particularmente en el campo de la geotecnia, mediante la implementación de un sistema basado en Arduino para la medición del contenido de humedad del suelo.



RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la confiabilidad del sistema Arduino con sensor HW-080 para la determinación del contenido de humedad del suelo, mediante su comparación con los métodos de referencia al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) durante los ensayos de campo en la progresiva 1+500 del tramo de la carretera de trocha carrozable Taraccasa, Abancay–Apurímac, 2025. La investigación fue de tipo aplicada, con enfoque cuantitativo, nivel explicativo y diseño experimental. La muestra estuvo conformada por cuatro calicatas ejecutadas en la zona de estudio, de las cuales se obtuvieron cuatro muestras de suelo evaluadas mediante tres métodos de determinación del contenido de humedad: sistema Arduino con sensor HW-080, método al horno (ASTM D2216) y método Speedy (ASTM D4944), realizándose tres repeticiones por cada método, con un total de 36 determinaciones experimentales.

Los resultados evidenciaron una correlación lineal adecuada entre el sistema Arduino y los métodos de referencia, obteniéndose $r = 0.993$ respecto al método al horno y $r = 0.966$ respecto al método Speedy ($p < 0.001$). Asimismo, el modelo de regresión presentó un coeficiente de determinación global de 99.78 %, mientras que la capacidad de estimación alcanzó $R^2 = 98.61$ % frente al método al horno y $R^2 = 93.37$ % respecto al método Speedy. Sin embargo, la prueba t para muestras relacionadas mostró diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones del sistema Arduino y los métodos convencionales ($p < 0.001$), identificándose un sesgo promedio de -1.133 % frente al método al horno y de -1.675 % frente al método Speedy, lo que evidencia una tendencia del sensor a subestimar el contenido de humedad. Además, el sistema Arduino presentó un coeficiente de variación de 22.14 %, superior al observado en el método al horno (15.42 %) y en el método Speedy (13.74 %), indicando una menor precisión y reproducibilidad relativa.

Se concluye que el sistema Arduino con sensor HW-080 constituye un prototipo preliminar con potencial de estimación en las condiciones evaluadas para la determinación in situ del contenido de humedad del suelo, debido a su elevada correlación y capacidad de estimación respecto a los métodos de referencia. No obstante, la existencia de diferencias estadísticamente significativas, el sesgo negativo y la mayor variabilidad observada indican que su aplicación requiere una



calibración específica para cada tipo de suelo, con el fin de mejorar la exactitud de las mediciones y ampliar su uso en actividades de control geotécnico y monitoreo de obras civiles.

Palabras clave: *contenido de humedad del suelo, Arduino, sensor HW-080, método al horno, método Speedy.*



ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the reliability of an Arduino-based system equipped with the HW-080 sensor for determining soil moisture content by comparing its performance with the oven-drying method (ASTM D2216) and the Speedy method (ASTM D4944) during field tests conducted at chainage 1+500 of the Taraccasa unpaved road, Abancay, Apurímac, Peru, in 2025.

The study followed an applied research approach, with a quantitative methodology, an explanatory level, and an experimental research design. The sample consisted of four test pits, from which four soil samples were collected and analyzed using three soil moisture determination methods: the Arduino system with the HW-080 sensor, the oven-drying method (ASTM D2216), and the Speedy method (ASTM D4944).

Each method was performed in triplicate, resulting in a total of 36 experimental measurements. The results revealed a suitable linear correlation between the Arduino system and the reference methods, with $r = 0.993$ for the oven-drying method and $r = 0.966$ for the Speedy method ($p < 0.001$). The regression analysis yielded an overall coefficient of determination (R^2) of 99.78%, while the predictive performance reached $R^2 = 98.61\%$ relative to the oven-drying method and $R^2 = 93.37\%$ relative to the Speedy method. Nevertheless, paired t -tests identified statistically significant differences between the Arduino measurements and the conventional methods ($p < 0.001$). The Arduino system exhibited an average negative bias of -1.133% compared with the oven-drying method and -1.675% compared with the Speedy method, indicating a systematic tendency to underestimate soil moisture content. Furthermore, the Arduino system showed a coefficient of variation of 22.14%, higher than that obtained for the oven-drying method (15.42%) and the Speedy method (13.74%), indicating lower relative precision and repeatability.

It is concluded that the Arduino-based system with the HW-080 sensor constitutes a preliminary prototype with potential for estimating soil moisture content in situ under the evaluated conditions, owing to its high correlation and predictive capability with respect to the reference methods.



However, the statistically significant differences, systematic negative bias, and higher measurement variability indicate that site-specific calibration is necessary to improve measurement accuracy and support its implementation in geotechnical investigations, quality control, and field monitoring applications in civil engineering.

Keywords: *soil moisture content, Arduino, HW-080 sensor, oven-drying method, Speedy method.*



CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

La determinación del contenido de humedad del suelo constituye uno de los parámetros geotécnicos de mayor importancia en la ingeniería civil, debido a que influye directamente en las propiedades físicas y mecánicas del terreno, tales como la compactación, resistencia al corte, capacidad portante, deformabilidad y estabilidad estructural. Estos parámetros condicionan el comportamiento de cimentaciones, pavimentos, terraplenes y demás obras de infraestructura, razón por la cual su medición constituye una actividad indispensable durante las etapas de diseño, construcción, supervisión y control de calidad. A nivel internacional, organismos técnicos como la American Society for Testing and Materials (ASTM) han establecido procedimientos normalizados para determinar el contenido de humedad del suelo, siendo el método gravimétrico ASTM D2216 el procedimiento de referencia por su elevada confiabilidad, mientras que la norma ASTM D4944 regula el método Speedy para determinaciones rápidas en campo.

Pese a la existencia de estos procedimientos normalizados, en la práctica profesional persisten limitaciones relacionadas con la rapidez, seguridad, costos operativos y facilidad de aplicación de los métodos convencionales. El método gravimétrico requiere el traslado de las muestras al laboratorio, equipos especializados y tiempos prolongados de secado, aspectos que dificultan la obtención inmediata de resultados durante la ejecución de obras. Por otra parte, el método Speedy, aunque reduce considerablemente el tiempo de ensayo, emplea carburo de calcio, un reactivo químico que demanda condiciones especiales de almacenamiento, transporte y manipulación debido a su carácter inflamable y reactivo, incrementando los riesgos para el operador y los costos asociados al proceso de medición.

En el contexto nacional, estas limitaciones adquieren mayor relevancia durante la ejecución de obras de infraestructura vial y edificaciones desarrolladas en zonas alejadas de los principales centros urbanos, donde el acceso a laboratorios especializados resulta



limitado y las decisiones técnicas deben adoptarse de manera inmediata. En estas circunstancias, la disponibilidad de métodos de medición rápidos, seguros, económicos y técnicamente confiables representa una necesidad permanente para garantizar el adecuado control geotécnico de los materiales utilizados durante los procesos constructivos.

Esta situación también se presenta en la región Apurímac, cuyas características geográficas, topográficas y climáticas dificultan el acceso oportuno a laboratorios especializados para la determinación del contenido de humedad del suelo. La ejecución de proyectos de pavimentación, estabilización de plataformas, construcción de cimentaciones y otras obras civiles demanda controles continuos de compactación y humedad, los cuales muchas veces deben realizarse directamente en campo. Sin embargo, la dependencia de métodos convencionales limita la rapidez con la que pueden obtenerse resultados confiables, afectando la oportunidad de la toma de decisiones durante la ejecución de las obras.

El diagnóstico de la problemática evidencia que actualmente existe la necesidad de disponer de sistemas alternativos para la medición del contenido de humedad del suelo que permitan obtener resultados técnicamente confiables, reduciendo simultáneamente los tiempos de ensayo, los costos operativos, la dependencia de laboratorios especializados y los riesgos derivados del empleo de reactivos químicos. Si esta situación continúa, persistirán retrasos en los procesos de control de calidad, incremento de costos operativos, limitaciones para realizar mediciones repetitivas en campo y mayores probabilidades de adoptar decisiones técnicas basadas en información obtenida de manera tardía, lo cual puede repercutir negativamente en la calidad y seguridad de las obras civiles.

Frente a este escenario, el control del pronóstico consiste en desarrollar e implementar tecnologías alternativas basadas en sistemas electrónicos de bajo costo que permitan realizar mediciones inmediatas del contenido de humedad del suelo, conservando niveles adecuados de precisión y confiabilidad respecto de los métodos tradicionalmente aceptados. Entre estas alternativas destacan los microcontroladores Arduino, debido a su facilidad de programación, bajo costo, versatilidad y posibilidad de integración con diferentes sensores electrónicos para la adquisición y procesamiento automático de datos.



En este contexto, la presente investigación propone desarrollar un sistema basado en un microcontrolador Arduino integrado con el sensor HW-080 para la medición del contenido de humedad del suelo *in situ*, evaluando su desempeño mediante la comparación con los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944). La finalidad es determinar si dicho sistema constituye un prototipo preliminar con potencial de estimación en las condiciones evaluadas para complementar los procedimientos convencionales de medición utilizados en la ingeniería geotécnica.

El objeto de estudio de la investigación está constituido por la confiabilidad de la medición del contenido de humedad del suelo obtenida mediante un sistema basado en Arduino con sensor HW-080, comparada con los métodos convencionales de referencia, considerando criterios de correlación, precisión, sesgo, error porcentual y capacidad de estimación.

1.2 Enunciado del problema

1.2.1 Problema general

¿En qué medida el sistema basado en Arduino con sensor HW-080 permite determinar de manera confiable el contenido de humedad del suelo *in situ*, en comparación con los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) en Apurímac, 2025?

1.2.2 Problemas específicos

- ¿Cuál es el grado de correlación entre los valores de contenido de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y los valores determinados por los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025?
- ¿Existen diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones del contenido de humedad del suelo obtenidas mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y las obtenidas mediante los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025?
- ¿Qué niveles de precisión y reproducibilidad presenta el sistema Arduino con sensor HW-080 en la determinación del contenido de humedad del suelo, en



comparación con los métodos de referencia al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025?

- ¿Cuál es el sesgo y la capacidad de estimación del sistema Arduino con sensor HW-080 respecto a los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) en la determinación del contenido de humedad del suelo durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025?

1.3 Justificación de la investigación

- **Justificación teórica**

La presente investigación se sustenta en la importancia del contenido de humedad del suelo como uno de los parámetros fundamentales en la ingeniería civil y geotécnica, debido a que influye directamente en propiedades como la compactación, la resistencia, la capacidad portante y la estabilidad del terreno, aspectos decisivos para el adecuado comportamiento de infraestructuras como pavimentos, cimentaciones y otras obras civiles. Desde esta perspectiva, la determinación precisa de la humedad del suelo constituye un tema de interés técnico y científico, ya que permite comprender mejor la relación entre las condiciones hídricas del terreno y su respuesta mecánica. Si bien el método Speedy, regulado por la norma ASTM D4944, ha sido ampliamente empleado para mediciones rápidas en campo, presenta limitaciones asociadas al uso de reactivos químicos peligrosos, restricciones operativas y costos que pueden dificultar su aplicación en determinados contextos. En este sentido, surge la necesidad de ampliar el conocimiento sobre alternativas tecnológicas más seguras, económicas y accesibles. Bajo este enfoque, el desarrollo de un prototipo basado en Arduino y el sensor HW-080 aporta al campo teórico al incorporar una nueva perspectiva de medición in situ del contenido de humedad del suelo, vinculando conceptos de instrumentación electrónica, automatización y evaluación geotécnica. Por ello, esta investigación busca generar sustento teórico sobre la viabilidad de integrar tecnologías de bajo costo en la medición de parámetros geotécnicos, contribuyendo al análisis y discusión de nuevas herramientas aplicables a la ingeniería civil.

- **Justificación metodológica**

La investigación radica en la necesidad de contar con procedimientos de medición del contenido de humedad del suelo que sean técnicamente funcionales, accesibles y aplicables en condiciones reales de campo. El contenido de humedad es un parámetro determinante en el comportamiento geotécnico del suelo, ya que influye directamente en su compactación, resistencia, estabilidad y capacidad de soporte, aspectos esenciales en el diseño y ejecución de obras civiles. En este contexto, el uso de un sistema basado en microcontrolador Arduino y sensor HW-080 constituye una propuesta metodológica innovadora, debido a que permite realizar mediciones de humedad de manera más rápida, segura y económica en comparación con métodos tradicionales como el Speedy, el cual requiere el empleo de reactivos químicos y mayores precauciones durante su manipulación. Asimismo, esta metodología resulta pertinente para zonas donde el acceso a equipos especializados es limitado, ya que plantea una alternativa tecnológica de bajo costo y fácil implementación. Por ello, la investigación no solo busca comparar el desempeño del sistema propuesto frente al método convencional, sino también aportar una metodología práctica y replicable que pueda ser utilizada en futuras evaluaciones geotécnicas y en proyectos de ingeniería civil desarrollados en contextos con restricciones tecnológicas y económicas.

- **Justificación práctica**

La presente investigación radica en la necesidad de disponer de una herramienta de medición del contenido de humedad del suelo que sea rápida, segura, económica y de fácil aplicación en condiciones reales de campo. En la práctica de la ingeniería civil, la determinación oportuna de este parámetro es fundamental para la toma de decisiones relacionadas con la compactación, estabilidad y control de calidad de los suelos en obras como pavimentos, cimentaciones, terraplenes y plataformas. Sin embargo, los métodos convencionales presentan limitaciones operativas que dificultan su uso frecuente, especialmente en zonas donde el acceso a equipos especializados o a laboratorios es restringido. Frente a ello, la implementación de un sistema basado en Arduino y el sensor HW-080 ofrece una alternativa práctica, al permitir mediciones in situ con menor complejidad, menor costo y sin necesidad de emplear reactivos químicos peligrosos. En consecuencia, esta investigación tiene utilidad práctica porque propone una solución aplicable a las necesidades reales del trabajo de campo, facilitando la evaluación del suelo de manera más accesible y



contribuyendo a mejorar los procedimientos de control geotécnico en proyectos de ingeniería civil.

- **Justificación social**

La investigación se sustenta en la importancia de promover soluciones tecnológicas accesibles que contribuyan al mejoramiento de las actividades de evaluación y control de suelos en obras de ingeniería civil, especialmente en contextos donde los recursos técnicos y económicos son limitados. La medición adecuada del contenido de humedad del suelo influye directamente en la seguridad, estabilidad y durabilidad de las infraestructuras, cuya funcionalidad repercute en la calidad de vida de la población. En este sentido, contar con un sistema de medición más económico, seguro y de fácil uso puede favorecer la ejecución de obras más confiables, reduciendo riesgos asociados a fallas constructivas y mejorando las condiciones de servicio para la sociedad. Asimismo, el uso de tecnologías de bajo costo, como Arduino y el sensor HW-080, fomenta la innovación tecnológica aplicada a problemas reales del entorno, facilitando su posible adopción en instituciones educativas, proyectos locales y entidades vinculadas al sector construcción. De esta manera, la investigación no solo aporta al ámbito técnico, sino también al desarrollo social, al promover alternativas que pueden fortalecer la capacidad de evaluación geotécnica en beneficio de la comunidad.

- **Justificación tecnológica**

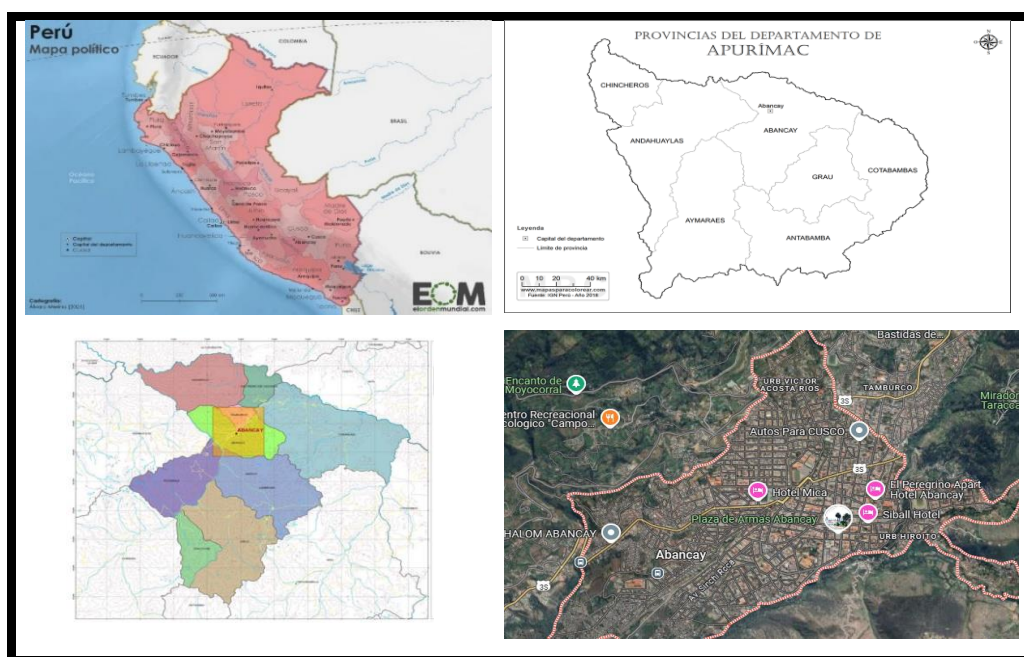
La investigación radica en la incorporación de herramientas electrónicas de bajo costo y fácil programación para la medición del contenido de humedad del suelo en condiciones de campo. El uso de un sistema basado en microcontrolador Arduino y sensor HW-080 representa una propuesta innovadora dentro del ámbito de la ingeniería civil, al integrar principios de automatización, instrumentación y adquisición de datos para la evaluación de un parámetro geotécnico de alta importancia. Esta tecnología permite desarrollar un prototipo funcional, portátil y accesible, capaz de proporcionar mediciones rápidas sin recurrir a procedimientos complejos ni al uso de reactivos químicos peligrosos. Asimismo, su implementación contribuye al aprovechamiento de tecnologías abiertas y adaptables, lo que facilita su mejora, replicación y aplicación en distintos contextos académicos y profesionales. En tal sentido, la investigación se justifica tecnológicamente porque promueve el uso de soluciones innovadoras y de bajo costo que pueden modernizar



los procesos de medición en campo, ampliando las posibilidades de integración entre la electrónica y la ingeniería geotécnica.

1.4 Ubicación y contextualización

La presente investigación se desarrolló en la región de Apurímac, ubicada en la zona sur andina del Perú, caracterizada por su relieve accidentado, diversidad topográfica y condiciones geográficas propias de la sierra. Esta región presenta una notable variedad de formaciones de suelo, donde predominan materiales como gravas, arenas, limos y arcillas, los cuales intervienen frecuentemente en la ejecución de obras de ingeniería civil, tales como cimentaciones, terraplenes, plataformas y pavimentos. Debido a estas condiciones, el estudio del comportamiento geotécnico del suelo adquiere especial importancia, ya que las características físicas y mecánicas del terreno pueden variar significativamente según su composición, grado de humedad y condiciones ambientales. En este contexto, la determinación del contenido de humedad del suelo constituye un parámetro esencial para evaluar procesos de compactación, estabilidad y capacidad de soporte, aspectos fundamentales para garantizar la seguridad y el adecuado desempeño de las infraestructuras construidas en la región. Por ello, Apurímac representa un escenario pertinente para el desarrollo de esta investigación, al ofrecer condiciones reales y representativas para analizar la aplicabilidad de métodos de medición de humedad del suelo en campo.



FUENTE: INEI, 2017

Figura 1 — Mapa de localización del desarrollo del estudio

CAPÍTULO II

OBJETIVOS E HIPÓTESIS

2.1 Objetivos de la investigación

2.1.1 Objetivo general

Evaluar en qué medida el sistema basado en Arduino con sensor HW-080 permite determinar de manera confiable el contenido de humedad del suelo in situ, mediante su comparación con los métodos al horno y Speedy (ASTM D4944) en Apurímac, 2025.

2.1.2 Objetivos específicos

- Determinar el grado de correlación entre los valores de contenido de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y los valores determinados por los métodos al horno y Speedy durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025.
- Comparar estadísticamente las mediciones de humedad obtenidas mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 con los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) en Apurímac, 2025.
- Evaluar los niveles de precisión y reproducibilidad del sistema Arduino con sensor HW-080 en la determinación del contenido de humedad del suelo, en comparación con los métodos de referencia al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) en Apurímac, 2025.
- Analizar el sesgo y la capacidad de estimación del sistema Arduino con sensor HW-080 respecto a los métodos al horno y Speedy en la determinación del contenido de humedad del suelo durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025.



2.2 Hipótesis de la investigación

2.2.1 Hipótesis general

El sistema basado en Arduino con sensor HW-080 permite determinar de manera confiable el contenido de humedad del suelo in situ, al presentar resultados comparables con los obtenidos mediante los métodos al horno y Speedy (ASTM D4944) en Apurímac, 2025.

2.2.2 Hipótesis específicas

- Existe una correlación positiva, alta y estadísticamente significativa entre los valores de contenido de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y los valores determinados por los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025.
- No existen diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones del contenido de humedad del suelo obtenidas mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y las obtenidas mediante los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025.
- El sistema Arduino con sensor HW-080 presenta niveles adecuados de precisión y reproducibilidad en la determinación del contenido de humedad del suelo, comparables a los obtenidos mediante los métodos de referencia al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025.
- El sistema Arduino con sensor HW-080 presenta un sesgo reducido y una adecuada capacidad de estimación respecto a los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) para la determinación del contenido de humedad del suelo durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025.

2.3 Operacionalización de variables

En la presente investigación, la operacionalización de variables permitió definir de forma concreta cómo se mediría el contenido de humedad del suelo mediante el método al horno y Speedy y el sistema Arduino con sensor HW-080, facilitando así la recolección de datos y la comparación objetiva entre ambos métodos.



Tabla 1 — Operacionalización de variables

Variables	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensión	Indicadores	Unidad / escala	Técnicas e instrumentos
Variable independiente: Método de medición del contenido de humedad del suelo	Procedimiento técnico utilizado para determinar el porcentaje de agua contenida en una muestra de suelo, mediante métodos normalizados o sistemas alternativos de medición.	Se operacionalizó mediante la aplicación de tres métodos de medición: sistema Arduino con sensor HW-080, método al horno ASTM D2216 y método Speedy ASTM D4944, aplicados a las mismas muestras de suelo para obtener valores comparables de humedad.	Métodos de medición	Sistema Arduino con sensor HW-080	Nominal: funciona	Observación técnica / ficha de registro
				Método al horno ASTM D2216	Porcentaje (%), coeficiente	Medición experimental / hoja de registro de datos
				Método Speedy ASTM D4944	Porcentaje (%), estadísticos descriptivos	Ensayo experimental / ficha de observación
Variable dependiente: Confiabilidad de la medición del contenido de humedad del suelo	Grado en que las mediciones obtenidas mediante un método determinado son consistentes, precisas y comparables respecto a métodos de referencia aceptados técnicamente.	Se midió comparando los resultados obtenidos con el sistema Arduino frente a los métodos de referencia al horno y Speedy, considerando indicadores estadísticos de correlación, precisión, reproducibilidad, sesgo, error porcentual y capacidad de estimación.	Correlación	Coeficiente de Pearson (r), IC95 %, valor p, R ²	Porcentaje / valor estadístico.	Análisis estadístico / ficha de registro.
			Comparabilidad estadística	Diferencia de medias, prueba t pareada, IC95 % de la diferencia, valor p	Porcentaje / valor estadístico.	Análisis estadístico / ficha de registro.
			Precisión y reproducibilidad	Desviación estándar, coeficiente de variación (CV), error estándar, varianza	Porcentaje (%).	Análisis estadístico / ficha de registro.
			Sesgo y capacidad de estimación	Sesgo promedio, error absoluto medio, sesgo porcentual, ecuación de regresión, R ² , capacidad predictiva	Porcentaje (%) / diferencia media.	Análisis comparativo / ficha de registro.

CAPÍTULO III

MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

3.1 Antecedentes

3.1.1 Antecedentes internacionales

- a) Almeida (2025), en su trabajo de investigación "Implementación de un sistema de monitoreo de temperatura y humedad mediante un ESP32 con notificaciones en telegram y visualización en Grafana." Este proyecto tiene como objetivo desarrollar un sistema de monitoreo de temperatura y humedad utilizando un microcontrolador ESP32 con sensores DHT11. El sistema está diseñado para proporcionar una supervisión continua de las condiciones ambientales en tiempo real, con una implementación económica y eficiente. El ESP32, con conectividad Wi-Fi y Bluetooth, es ideal para proyectos de Internet de las Cosas (IoT), con un bajo consumo energético de menos de 300 mA. El sensor DHT11 mide temperatura en un rango de 0 a 50°C con una precisión de $\pm 2^{\circ}\text{C}$ y humedad de 20 a 90% con un margen de error de $\pm 5\%$.

Los datos recolectados se almacenan de manera segura en una base de datos InfluxDB, permitiendo un registro eficiente. Los datos se visualizan en Grafana, donde se presentan gráficos en tiempo real con mediciones de temperatura y humedad. Esta plataforma de visualización facilita la interpretación de los datos con intervalos de medición cada 30 minutos, asegurando que se pueda hacer un seguimiento constante de las condiciones del ambiente.

Una característica clave es la integración de la API de Telegram, que envía notificaciones automáticas en caso de que las mediciones superen los valores umbrales definidos, como temperaturas de más de 30°C o humedad por encima del 80%. Estas alertas permiten una respuesta rápida ante irregularidades, mejorando la gestión del ambiente monitoreado.



Los resultados muestran que el sistema fue implementado con éxito, con la conexión estable entre el ESP32 y los sensores DHT11. Los datos se visualizaron correctamente en Grafana y las notificaciones a través de Telegram se enviaron sin problemas. Las pruebas confirmaron que el sistema funciona eficientemente, proporcionando datos confiables y asegurando una respuesta oportuna ante irregularidades.

En conclusión, el proyecto validó la elección de componentes como el ESP32 y el DHT11, destacando por su bajo costo y capacidad de integración. Se recomienda agregar más sensores y explorar nuevas plataformas de visualización para optimizar el sistema.

- b) Nandi y Shrestha (2024), en la investigación titulada “Evaluación de sensores de humedad del suelo de bajo costo y de gama alta en diversos rangos de humedad y texturas del suelo”, tuvieron como objetivo evaluar el desempeño de sensores de humedad del suelo de bajo costo y de gama alta en diferentes texturas de suelo y rangos de humedad, con la finalidad de determinar su precisión y confiabilidad como alternativas para el monitoreo del contenido de humedad.

La metodología consistió en realizar ensayos experimentales de laboratorio utilizando suelos de textura gruesa, media y fina, con contenidos de humedad controlados entre 0 % y 50 %. Se comparó el comportamiento de sensores resistivos y capacitivos de bajo costo frente a sensores comerciales de mayor precisión. La evaluación del desempeño se efectuó mediante indicadores estadísticos como el error cuadrático medio (RMSE), el coeficiente de determinación (R^2) y el análisis de las diferencias entre las mediciones obtenidas.

Los resultados demostraron que los sensores de bajo costo mejoraron significativamente su desempeño después del proceso de calibración, alcanzando errores comparables con sensores comerciales y diferencias que, en algunos casos, no fueron estadísticamente significativas. Asimismo, se

determinó que la exactitud de las mediciones depende de la textura del suelo y de una adecuada calibración previa del sensor.

Los autores concluyeron que los sensores electrónicos de bajo costo constituyen una alternativa técnicamente viable para la determinación del contenido de humedad del suelo, siempre que sean calibrados y validados antes de su aplicación. Este antecedente guarda relación directa con la presente investigación, ya que ambos estudios evalúan la confiabilidad de sistemas de medición de humedad del suelo mediante sensores electrónicos de bajo costo y comparan su desempeño mediante indicadores de precisión y exactitud.

- c) Alaña y Moreira (2025), en su trabajo de investigación “Desarrollo de un sistema de monitoreo inalámbrico de temperatura y humedad aplicado a un sistema de riego en zonas rurales basado en Arduino y comunicación LORA WAN”. El propósito de este trabajo es desarrollar un sistema automatizado de monitoreo y control de riego en zonas rurales, utilizando tecnología de comunicación inalámbrica LoRa WAN y microcontroladores. El sistema integra sensores para medir temperatura, humedad del aire y humedad del suelo, junto con relés que controlan las bombas de agua basándose en las condiciones detectadas o mediante comandos remotos. El prototipo utiliza un ESP32 para gestionar la comunicación bidireccional con los nodos remotos, que recopilan los datos mediante sensores DHT11 y FC-28. El sistema funciona de manera autónoma gracias a un panel fotovoltaico y una batería de plomo-ácido, y la programación se realizó en C++, facilitando una integración eficiente entre el hardware y el software.

Este sistema está diseñado para optimizar el uso del agua en el riego y garantizar su funcionamiento en zonas con acceso limitado a electricidad e Internet debido a su alimentación solar. La implementación también reduce la intervención manual, minimiza los errores humanos y mejora la productividad agrícola. Los resultados del prototipo validan su aplicación en entornos rurales, consolidándose como una solución tecnológica sostenible y escalable para la gestión hídrica en la agricultura.

Se desarrolló un prototipo funcional que permitió monitorear remotamente las condiciones ambientales y controlar las bombas de riego. El sistema se comunica de manera efectiva mediante LoRa WAN y visualiza los datos en tiempo real a través de una página web accesible desde cualquier dispositivo con conexión a Internet. Este sistema se valida como una herramienta eficaz para la gestión de riego en zonas rurales, optimizando los recursos hídricos y garantizando la continuidad operativa en áreas con acceso limitado a la infraestructura convencional.

La interfaz web facilita el control remoto y la supervisión, asegurando la eficacia del sistema. Además, la autonomía energética proporcionada por el panel solar y la batería garantiza la operación continua del sistema en zonas sin acceso constante a electricidad.

- d) Miranda (2024), en su investigación titulada *“Análisis comparativo para la determinación del contenido de humedad del suelo por los métodos de estufa, sartén, prueba rápida y balanza infrarroja”*, tuvo como objetivo comparar la determinación del contenido de humedad del suelo mediante los métodos de estufa, sartén (frigideira), Speedy Test y balanza infrarroja. Los ensayos fueron desarrollados en el Laboratorio de Ferrovías y Asfalto de la Universidad Federal de Ouro Preto, empleando dos tipos de suelo: silto-arenoso y arcillo-arenoso, procedentes del norte de Minas Gerais y del sur de São Paulo, respectivamente. Los resultados evidenciaron que los métodos de estufa, sartén y balanza infrarroja presentaron valores satisfactorios y relativamente cercanos entre sí, lo que demuestra una adecuada consistencia en la determinación de humedad. En el caso del suelo silto-arenoso, se obtuvieron los siguientes contenidos de humedad: 17,32 % con estufa, 18,13 % con sartén, 16,47 % con Speedy Test y 17,20 % con balanza infrarroja. Por otro lado, en el suelo arcillo-arenoso, los resultados fueron: 34,58 % con estufa, 37,74 % con sartén, 26,93 % con Speedy Test y 33,00 % con balanza infrarroja. A partir de estos hallazgos, se observó que el método Speedy Test presentó mayor diferencia respecto al método de estufa, especialmente en el

suelo de mayor contenido de finos, lo que sugiere posibles limitaciones en su desempeño para ciertos tipos de suelo.

El método de frigideira fue el más rápido, con un tiempo de estabilización de 50 minutos, mientras que la estufa necesitó 24 horas para obtener resultados completos. La balanza infrarroja, aunque no es normativa, mostró resultados favorables comparados con la estufa, siendo rápida (con estabilización entre 10 a 20 minutos), pero con un costo elevado.

Por otro lado, el Speedy Test mostró resultados discrepantes en ambos tipos de suelo. En el caso del suelo silto arenoso, la medición fue de 16,47%, por debajo de los otros métodos, y en el suelo argilo arenoso, los resultados del Speedy Test fueron de 26,93%, también más bajos en comparación con los demás métodos.

La humedad relativa del aire (85%) durante los ensayos pudo haber afectado las mediciones de los métodos de estufa, frigideira y balanza infrarroja, dado que una alta humedad puede interferir en las mediciones de humedad. En el caso del Speedy Test, las variaciones podrían haber sido causadas por una falta de calibración del manómetro o la falta de experiencia del operador.

En resumen, los métodos de estufa, frigideira y balanza infrarroja proporcionaron resultados similares y satisfactorios, mientras que el Speedy Test mostró mayor variabilidad, especialmente en suelos con mayor contenido de arcilla.

- e) Herrera (2024), en su trabajo de investigación “Calibración de sensores de humedad del suelo con validación de campo: Calibración de sensores de humedad del suelo “PT91” El Arenal”. Este estudio se centra en el desarrollo de curvas de calibración para dos sensores de humedad del suelo propiedad de FONAG. Los sensores CS650 de Campbell Scientific, que emplean la ecuación de Topp et al. (1980), fueron instalados en la estación PT91 "El Arenal" en dos sitios: uno con biomanto y otro sin biomanto. La generación de las curvas de calibración se realizó mediante el método no destructivo TDR



(Time Domain Reflectometry), en el cual se saturaron y secaron muestras de suelo inalteradas, insertando los sensores para medir la permitividad dieléctrica y relacionarla con el contenido volumétrico de agua determinado en laboratorio.

Las curvas de calibración obtenidas se aplicaron a series temporales de contenido volumétrico de humedad, y los resultados se compararon con los datos históricos registrados por los sensores. Las gráficas mostraron una subestimación del contenido de agua cuando se utilizó la ecuación estándar de Topp et al. (1980).

Para validar los resultados y caracterizar el suelo, se realizaron ensayos de propiedades físicas en los puntos PT91-CB y PT91-SB, donde se encontraron los siguientes resultados: densidad aparente seca de 1.44 g/cm³ y 1.47 g/cm³, densidad aparente húmeda de 1.68 g/cm³ y 1.72 g/cm³, gravedad específica de 2.609 y 2.517, porosidad de 45% y 42%, materia orgánica de 2.88% y 2.48%, pH de 6.62 y 6.22, textura areno-limosa y contenido gravimétrico de humedad de 17% en ambos puntos de análisis. Estos resultados evidencian la vulnerabilidad de los suelos de páramo al sobrepastoreo de ganado ovino.

En resumen, las muestras de suelo alteradas e inalteradas fueron tomadas en el sitio “El Arenal” para su análisis físico. Se midió la permitividad dieléctrica y el contenido volumétrico de agua desde el punto de saturación hasta el seco, desarrollando ecuaciones de calibración de sensores para cada muestra de suelo. Posteriormente, se compararon los resultados obtenidos con las series históricas de contenido volumétrico de humedad, utilizando la ecuación calibrada y la ecuación estándar.

- f) Carranza, Camacho y Ribiano (2023), en su trabajo de investigación “Validación de un modelo para la estimación del contenido de agua del suelo mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano”. Este estudio tiene como objetivo validar un modelo para estimar el contenido de agua en el suelo utilizando espectroscopía de reflectancia difusa en el rango infrarrojo cercano (NIR). Los suelos analizados provienen de Puerto Gaitán (Meta), Espinal

(Tolima) y Mosquera (Cundinamarca), utilizando redes rígidas para seleccionar puntos de muestreo a diferentes profundidades (0-10 cm y 10-30 cm). Se tomaron muestras y se evaluó el contenido de humedad en tres niveles: 0, 15 y 30%. Se usó estadística descriptiva para analizar los datos y se realizó una validación cruzada para cada modelo.

Los resultados mostraron que la espectroscopía NIR es eficaz para estimar el contenido de agua en el suelo. A través del análisis de componentes principales, se identificó una diferenciación en el contenido de humedad de los suelos evaluados. En cuanto a la espectroscopía, los resultados revelaron que la reflectancia disminuye conforme aumenta el contenido de agua del suelo, siguiendo una tendencia relacionada con la capacidad de retención de agua del suelo.

Se destacó que el Speedy Test también fue útil para las mediciones de humedad, pero se observó que la reflectancia en las longitudes de onda de 1.450 nm y 1.950 nm mostró una relación directa con el contenido de agua en el suelo. Los resultados espectrales indicaron que el contenido de agua del suelo afecta la absorción en 1.400 nm, 1.900 nm y en el rango de 2.300-2.500 nm, lo que influye en la medición del contenido de humedad.

- g) Raheja et al. (2025), desarrollaron y calibraron en campo un sensor capacitivo de bajo costo basado en microcontrolador para la medición de humedad del suelo en un sistema de riego por goteo subsuperficial. El estudio tuvo como objetivo diseñar un módulo de monitoreo de humedad con transmisión de datos, calibrar sensores capacitivos de bajo costo y validar sus resultados frente a un sensor comercial SM150T. La metodología incluyó ensayos de laboratorio y campo, análisis de regresión y evaluación mediante indicadores de error, como MAE, RMSE y RAE. Los resultados mostraron una alta asociación entre el sensor desarrollado y el sensor comercial, con coeficientes de correlación superiores a 0,98, además de valores bajos de error. Los autores concluyeron que, luego de una calibración específica del suelo, los sensores capacitivos de bajo costo pueden alcanzar un desempeño comparable al de equipos comerciales, lo cual resulta pertinente para



investigaciones orientadas a validar sistemas alternativos de medición de humedad del suelo in situ.

- h) Abdelmoneim et al. (2025), investigaron la calibración de sensores capacitivos de humedad del suelo de bajo costo, específicamente el modelo SKU: SEN0193, en un suelo franco limoso de la región de Puglia, Italia. El objetivo fue establecer una función de calibración que permitiera mejorar la exactitud de estos sensores para su integración en soluciones inteligentes de monitoreo agrícola. La metodología consideró 12 sensores, tres réplicas por sensor y cinco niveles de humedad gravimétrica, desde condiciones secas hasta saturación. Los resultados evidenciaron valores de R^2 entre 0,85 y 0,87, con RMSE entre 4,5 % y 4,9 %, además de una variabilidad entre sensores más elevada cuando la humedad superaba el 30 %. El estudio concluyó que la calibración es indispensable para garantizar mediciones confiables en sensores de bajo costo, lo cual guarda relación directa con la necesidad de validar el sistema Arduino con sensor HW-080 frente a métodos de referencia.
- i) Adla et al. (2024), evaluaron el impacto de calibrar un sensor de humedad de suelo de bajo costo basado en capacitancia sobre el desempeño del modelo AquaCrop. El objetivo fue determinar si los datos de sensores económicos podían utilizarse de manera confiable en modelos agrohidrológicos, siempre que fueran previamente calibrados. La investigación empleó datos de laboratorio y campo, aplicando modelos de regresión lineal, regresión por tramos y técnicas de aprendizaje automático. Los resultados indicaron que la calibración de campo mediante regresión lineal por tramos obtuvo un R^2 de 0,76 y un RMSE de 3,13 % en calibración, mientras que en validación alcanzó un R^2 de 0,67 y un RMSE de 4,57 %. Los autores concluyeron que el uso de sensores de bajo costo sin calibración puede generar resultados deficientes, mientras que la calibración adecuada mejora la capacidad predictiva y la utilidad de los datos, aspecto relevante para el presente estudio, que busca determinar la confiabilidad del sistema Arduino respecto a métodos convencionales.

- j) Pitoro et al. (2025), desarrollaron y evaluaron un sistema de monitoreo de humedad del suelo utilizando sensores capacitivos de bajo costo integrados a un microcontrolador Arduino, aplicado al manejo del riego en cultivo de col rizada. El objetivo fue validar la viabilidad de sensores económicos para estimar la humedad del suelo y apoyar decisiones de riego en contextos con limitaciones tecnológicas. La metodología incluyó calibración de laboratorio mediante el método gravimétrico y validación de campo, comparando estrategias de riego basadas en evapotranspiración, tensiómetros y sensores capacitivos. Los resultados mostraron una fuerte correlación inversa entre las lecturas del sensor y la humedad del suelo, con R^2 superior a 0,95 y RMSE menor a 0,05. Asimismo, no se encontraron diferencias significativas entre las estrategias de manejo evaluadas. El estudio concluyó que los sensores capacitivos integrados con Arduino representan una alternativa viable, económica y funcional para la estimación de humedad del suelo, especialmente en condiciones de recursos limitados.
- k) Al-Rawi (2024), evaluó la precisión de cuatro sensores de humedad del suelo de bajo y mediano costo, dos capacitivos y dos resistivos, mediante calibración con el método gravimétrico en seis tipos de suelo de la región central de Irak. El objetivo fue determinar la exactitud de estos sensores después de su calibración y establecer su aplicabilidad en el manejo del riego. La metodología comparó dos procedimientos de calibración gravimétrica y analizó indicadores como error estándar, desviación media absoluta, RMSE, MAPE y coeficiente de determinación. Los resultados mostraron que el sensor WH51 presentó el menor error y el mayor R^2 , mientras que los sensores de bajo costo alcanzaron niveles de precisión aceptables después de la calibración. El autor concluyó que los sensores económicos pueden utilizarse en la medición de humedad del suelo siempre que sean calibrados adecuadamente según el tipo de suelo, reforzando la importancia de comparar cualquier sistema alternativo con métodos de referencia confiables.

3.1.2 Antecedentes nacionales

- a) Huaman, Milla y Ávila (2024), en su trabajo de investigación “El contenido de humedad y el valor de soporte en suelos cohesivos en el distrito de



Independencia”. El estudio tuvo como objetivo analizar la relación entre el contenido de humedad (CH) y el valor de soporte (CBR), así como la densidad del suelo cohesivo en la subrasante del barrio de Shancayán, en Huaraz, Áncash, bajo diferentes condiciones de golpes por capa (12, 26 y 55). Para realizar este análisis, se generaron mapas de isolíneas de CBR utilizando herramientas como Excel y OriginPro 2019b. El enfoque del estudio fue cuantitativo, con un diseño experimental, deductivo y transversal. Para la recolección de datos, se usaron fichas y formatos de laboratorio, complementados con fuentes bibliográficas como normativas del MTC, artículos científicos, tesis y libros especializados.

Los resultados de las pruebas de penetración a 0.1” y 0.2” revelaron que, inicialmente, tanto el CBR como la densidad aumentan con el contenido de humedad, pero a partir de cierto punto, ambos valores comienzan a disminuir cuando el CH supera niveles específicos. Los valores óptimos de contenido de humedad para obtener el máximo CBR fueron 13.5%, 12.5% y 10.45% para 12, 26 y 55 golpes por capa, respectivamente. En conclusión, se observó que la relación entre el contenido de humedad y el CBR es inversamente proporcional cuando el CH excede el contenido de humedad óptimo (CHO). Por el contrario, la relación entre contenido de humedad y densidad es directamente proporcional cuando el CH se encuentra por debajo del CHO.

- b) Apaza y Chávez (2023), en su trabajo de investigación “Determinación del contenido de humedad y su relación con la deformación del suelo en el asentamiento humano urbanización nueva Locumba, Jorge Basadre, Tacna 2023” El objetivo de esta tesis fue determinar la relación entre el contenido de humedad y la deformación del suelo en el Asentamiento Humano Urbanización Nueva Locumba, en Jorge Basadre. Para ello, se realizó una investigación exploratoria, con visitas de campo, consultas a habitantes locales y recolección de muestras en la zona. Se tomaron cuatro muestras de suelo, las cuales fueron analizadas en un laboratorio externo.

Los resultados mostraron que el suelo es colapsable debido a su densidad, límites de consistencia, sales solubles y vacíos. Se identificó que la relación



entre el contenido de humedad y la deformación del suelo es directamente proporcional, con un potencial de colapso entre 0,14% y 0,62%. El contenido de humedad natural varía entre 4,92% y 11,87%.

Las propiedades del suelo incluyen arena limosa no plástica, con bajo contenido de arcillas, y una densidad natural seca de 1,618 g/cm³ a 1,950 g/cm³. Las sales solubles del suelo tienen concentraciones de 15.550 a 29.404 p.p.m., los cloruros solubles van de 900 a 5.400 p.p.m., y los sulfatos solubles tienen valores entre 1.500 y 12.500 p.p.m.

- c) Aldana (2022), en su trabajo de investigación “Efecto de la humedad en el comportamiento dinámico de suelos finos, barrio San Carlos, distrito de Huancayo, año 2022” El objetivo de esta investigación fue estudiar el efecto de la humedad en el comportamiento dinámico de suelos finos, analizando variables como el módulo de elasticidad, el módulo de corte y el amortiguamiento. Para ello, se realizaron ensayos en laboratorio con muestras del Barrio San Carlos, donde se llevaron a cabo pruebas de caracterización de suelos y ensayos triaxiales con distintos niveles de contenido de humedad. Los resultados mostraron que el suelo estudiado se clasifica como ML y CL-ML.

Se obtuvieron valores de módulo de elasticidad entre 14.9 MPa y 22.1 MPa, módulo de corte entre 4.49 MPa y 8.5 MPa, y amortiguamiento entre 3.11% y 5.29%, todos ellos correlacionados con el contenido de humedad. A partir de los datos obtenidos, se generaron gráficos que muestran la variación de estos parámetros en función del contenido de humedad.

Se concluyó que el módulo de elasticidad y el módulo de corte aumentan a medida que el contenido de humedad crece, pero disminuyen después de alcanzar un punto crítico. En cambio, el amortiguamiento sigue aumentando durante todo el rango de humedad analizado en la investigación.



3.2 Marco teórico

3.2.1 Contenido de humedad del suelo

El contenido de humedad del suelo es una de las propiedades físicas más importantes en la ingeniería geotécnica, debido a que condiciona el comportamiento mecánico e hidráulico de los materiales que conforman el terreno. Se define como la cantidad de agua presente en los espacios vacíos del suelo respecto a la masa de sólidos secos, constituyendo un parámetro fundamental para caracterizar el estado natural del suelo y evaluar su respuesta frente a cargas estáticas y dinámicas. La humedad interviene directamente en fenómenos como la deformación, consolidación, permeabilidad, resistencia al corte y estabilidad de taludes, razón por la cual su determinación constituye un procedimiento indispensable durante la exploración geotécnica y el control de calidad de obras civiles (Das y Sobhan, 2018).

Desde el punto de vista físico, el agua presente en el suelo puede encontrarse como agua gravitacional, capilar o adsorbida, dependiendo de la energía con la que se encuentra retenida entre las partículas minerales. Esta distribución influye sobre la interacción entre las partículas sólidas y determina las propiedades mecánicas del suelo, especialmente en materiales finos donde predominan los efectos de la succión matricial. Diversas investigaciones han demostrado que pequeñas variaciones en el contenido de humedad pueden generar cambios significativos en la rigidez, compresibilidad y resistencia del terreno, particularmente en suelos cohesivos (Lu y Likos, 2004).

La humedad gravimétrica corresponde al método tradicional empleado para cuantificar el contenido de agua del suelo y constituye el procedimiento de referencia utilizado internacionalmente. Se expresa como la relación entre la masa de agua contenida en una muestra y la masa de suelo seco, generalmente expresada en porcentaje. Este parámetro se determina mediante el secado de la muestra en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C, hasta alcanzar masa constante, procedimiento normalizado en la ASTM D2216 y ampliamente utilizado como patrón para validar métodos rápidos de medición (ASTM International, 2023).

La humedad gravimétrica presenta elevada precisión y reproducibilidad, razón por la cual continúa siendo el estándar de comparación para nuevas tecnologías de



medición de humedad in situ. Sin embargo, su principal limitación radica en el tiempo requerido para obtener resultados, aspecto que restringe su aplicación en procesos constructivos donde se requiere información inmediata para la toma de decisiones. En consecuencia, numerosos estudios recientes han evaluado sensores electrónicos y sistemas automatizados que permitan estimar este parámetro con precisión comparable al método gravimétrico convencional (Seyfried y Murdock, 2004).

3.2.2 Condiciones geotécnicas

Se refieren a las propiedades físicas y mecánicas de los suelos que afectan su comportamiento en términos de estabilidad y capacidad de carga. Estas condiciones son esenciales para el diseño de infraestructuras y para la prevención de desastres naturales como deslizamientos o hundimientos.

Las condiciones geotécnicas incluyen propiedades como la densidad, la cohesión, el ángulo de fricción interna, entre otras, que determinan el comportamiento del suelo bajo diferentes cargas y condiciones de humedad (Juárez y Rico, 1997).

En ingeniería geotécnica, el contenido de humedad constituye uno de los parámetros básicos para el diseño, construcción y mantenimiento de cimentaciones, carreteras, presas, rellenos y otras infraestructuras civiles. La variación de la humedad modifica el estado de esfuerzos efectivos dentro del suelo, alterando sus propiedades mecánicas y su comportamiento frente a sollicitaciones externas. Por ello, los estudios geotécnicos incorporan sistemáticamente la determinación de humedad como parte de la caracterización física de los materiales de fundación (Coduto, Yeung y Kitch, 2016).

Asimismo, el conocimiento del contenido de humedad permite interpretar adecuadamente los resultados de ensayos de laboratorio como límites de Atterberg, compactación Proctor, resistencia CBR, corte directo y compresión triaxial, ya que todos ellos dependen en mayor o menor medida del estado hídrico del suelo. En proyectos de infraestructura, la medición confiable de este parámetro reduce la incertidumbre durante el diseño geotécnico y contribuye a optimizar los procesos constructivos mediante un adecuado control tecnológico (Budhu, 2015).

Las condiciones geotécnicas son determinantes para comprender la respuesta de los suelos ante variaciones de carga, humedad y temperatura, lo que permite un diseño adecuado de cimientos y estructuras (Bowles, 1981).

Las condiciones geotécnicas engloban un conjunto de características físicas y mecánicas del suelo que son esenciales para evaluar su comportamiento frente a esfuerzos externos, asegurando la seguridad y durabilidad de las construcciones (Terzaghi, Peck y Mesri, 1996).

3.2.3 Métodos de medición del contenido de humedad del suelo

La determinación del contenido de humedad del suelo constituye una actividad esencial en la ingeniería geotécnica, debido a que este parámetro influye directamente en el comportamiento físico y mecánico del terreno. La selección del método de medición depende de factores como la precisión requerida, el tiempo disponible, el costo del ensayo, el tipo de suelo y las condiciones de campo o laboratorio. Actualmente existen diversos procedimientos normalizados y tecnologías emergentes que permiten estimar el contenido de humedad mediante principios físicos, químicos o electromagnéticos, los cuales se clasifican principalmente en métodos directos e indirectos, así como en métodos destructivos y no destructivos (ASTM International, 2023; Das y Sobhan, 2018).

En las últimas décadas, el desarrollo de sensores electrónicos, microcontroladores y tecnologías de monitoreo en tiempo real ha impulsado el uso de métodos rápidos para la determinación de la humedad del suelo. Sin embargo, los métodos convencionales continúan siendo el patrón de referencia para validar nuevas tecnologías debido a su elevada exactitud y confiabilidad. Por ello, la literatura científica recomienda que todo sistema alternativo de medición sea comparado con el método gravimétrico establecido en la norma ASTM D2216 antes de ser utilizado en aplicaciones geotécnicas o de control de calidad (Robinson et al., 2008; ASTM International, 2023).

3.2.3.1 Métodos directos

Los métodos directos son aquellos que determinan el contenido de humedad del suelo mediante la medición de la cantidad real de agua presente en una muestra, a partir de la diferencia entre su masa húmeda y su masa seca. Estos



procedimientos permiten obtener el contenido de humedad gravimétrico sin recurrir a modelos de estimación o correlaciones indirectas, razón por la cual constituyen los métodos de referencia para la calibración y validación de otras técnicas de medición (ASTM International, 2023).

El método gravimétrico, normalizado por la ASTM D2216, es el procedimiento de referencia más utilizado en ingeniería geotécnica. Consiste en determinar la masa inicial de la muestra de suelo, secarla en horno a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante y calcular el contenido de humedad como la relación entre la masa de agua evaporada y la masa del suelo seco, expresada en porcentaje. Debido a su elevada exactitud, precisión y reproducibilidad, este método es ampliamente empleado en estudios geotécnicos, control de calidad de materiales y calibración de equipos de medición de humedad.

Dentro de los métodos directos también se considera el método Speedy, normalizado mediante la ASTM D4944, el cual determina el contenido de humedad a partir de una reacción química entre el agua contenida en la muestra y el carburo de calcio. Esta reacción genera gas acetileno, cuya presión es proporcional al contenido de humedad y es medida mediante un manómetro calibrado. Aunque este procedimiento proporciona resultados en un tiempo considerablemente menor que el método gravimétrico, requiere una adecuada manipulación de reactivos químicos y un proceso de calibración para garantizar la confiabilidad de las mediciones.

En ingeniería civil, los métodos directos constituyen la base para la determinación del contenido de humedad del suelo, debido a que proporcionan resultados con alta confiabilidad y sirven como referencia para evaluar el desempeño de métodos alternativos basados en sensores electrónicos, técnicas electromagnéticas o sistemas automatizados de adquisición de datos.



3.2.3.2 Métodos indirectos

Los métodos indirectos estiman el contenido de humedad a partir de la medición de propiedades físicas del suelo que presentan una correlación con la cantidad de agua presente. Estas propiedades incluyen la constante dieléctrica, la resistividad eléctrica, la conductividad térmica, la capacitancia y la reflexión de ondas electromagnéticas, entre otras. Debido a que no determinan directamente la masa de agua, requieren procesos previos de calibración utilizando métodos gravimétricos para garantizar la confiabilidad de los resultados (Robinson et al., 2008).

Entre los métodos indirectos más utilizados destacan la Reflectometría en el Dominio del Tiempo (TDR), la Reflectometría en el Dominio de la Frecuencia (FDR), los sensores capacitivos, los sensores resistivos y los sensores basados en microcontroladores como Arduino. Estos sistemas permiten obtener mediciones prácticamente instantáneas y realizar monitoreo continuo en campo, lo que representa una ventaja importante durante la ejecución de proyectos de ingeniería. No obstante, su precisión puede verse afectada por factores como la textura del suelo, la densidad, la temperatura, la salinidad y la composición mineralógica, razón por la cual requieren calibraciones específicas para cada tipo de suelo (Vereecken et al., 2008; Bogen et al., 2015).

Actualmente, los sensores electrónicos de bajo costo han despertado un creciente interés debido a su facilidad de implementación y su potencial para aplicaciones de monitoreo geotécnico en tiempo real. Sin embargo, diversos estudios concluyen que estos dispositivos deben ser validados experimentalmente frente a métodos normalizados antes de ser empleados en procesos de control de calidad o investigación científica (Bogen et al., 2015).

3.2.3.3 Métodos destructivos

Los métodos destructivos son aquellos que alteran permanentemente la muestra durante el proceso de medición, impidiendo su reutilización para otros ensayos geotécnicos. En estos procedimientos la muestra experimenta cambios físicos o químicos irreversibles, ya sea por evaporación del agua,



calentamiento, trituración o reacciones químicas utilizadas para cuantificar el contenido de humedad (Coduto, Yeung y Kitch, 2016).

El ensayo gravimétrico en horno constituye el ejemplo más representativo de método destructivo, ya que elimina completamente el agua contenida en el suelo mediante calentamiento. De manera similar, el método Speedy consume parte de la muestra durante la reacción química con carburo de calcio, modificando sus características originales. Aunque estos procedimientos ofrecen elevados niveles de precisión, presentan la limitación de requerir tiempos relativamente prolongados o el empleo de reactivos especializados, lo que dificulta su utilización para monitoreo continuo en campo (ASTM International, 2022; ASTM International, 2023).

3.2.3.4 Métodos no destructivos

Los métodos no destructivos permiten determinar el contenido de humedad sin alterar significativamente la estructura física del suelo, posibilitando la realización de mediciones repetidas sobre una misma muestra o directamente sobre el terreno. Esta característica resulta especialmente útil para el monitoreo continuo de procesos geotécnicos, agrícolas y ambientales, donde es necesario registrar variaciones temporales del contenido de humedad sin modificar las condiciones naturales del suelo (Robinson et al., 2008).

Entre las tecnologías más empleadas destacan los sensores TDR, FDR, sensores capacitivos, sensores de impedancia eléctrica y equipos basados en radiación de neutrones o rayos gamma. Estas tecnologías reducen considerablemente el tiempo de medición y facilitan el almacenamiento digital de la información; sin embargo, su precisión depende de una adecuada calibración y validación frente a métodos de referencia como el gravimétrico o el método Speedy (Bogena et al., 2015; Vereecken et al., 2008).

En ingeniería geotécnica, los métodos no destructivos representan una alternativa prometedora para el control de calidad durante la construcción, especialmente cuando se requiere una alta frecuencia de mediciones. No obstante, la literatura científica coincide en que su implementación debe sustentarse en estudios de correlación, precisión y reproducibilidad que

demuestren su equivalencia respecto a los métodos tradicionales establecidos por las normas ASTM (ASTM International, 2023).

Tabla 2 — Principales ensayos para conocer las propiedades del suelo

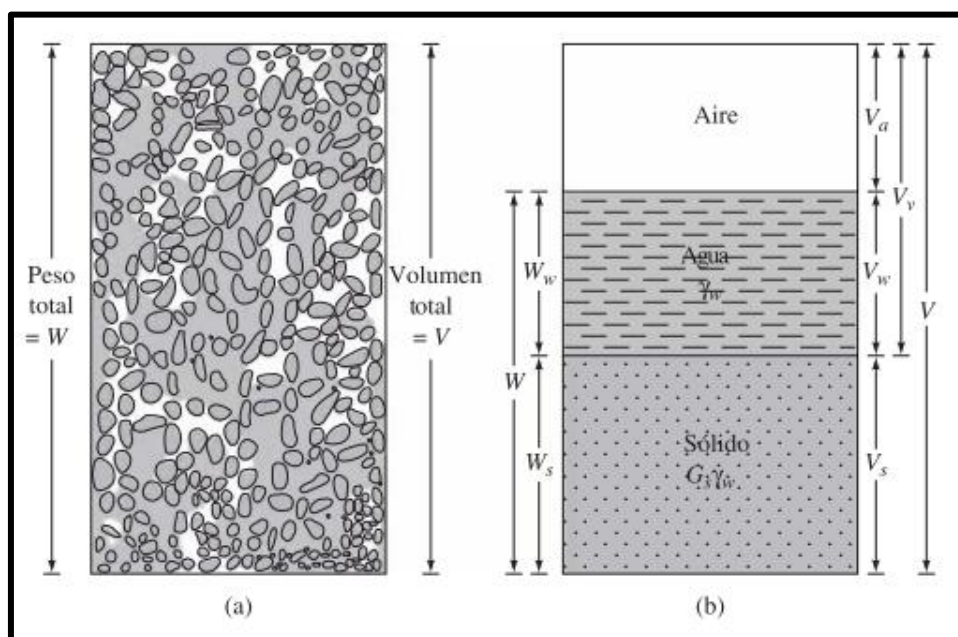
Nombre del Ensayo	Descripción	Norma ASTM
Contenido de humedad (método gravimétrico)	Determina el contenido de humedad al pesar la muestra antes y después de secarla	ASTM D2216
Límites de Atterberg	Evalúa la plasticidad de un suelo mediante el límite líquido y plástico	ASTM D4318
Granulometría (tamizado)	Clasifica el suelo según el tamaño de sus partículas usando un tamizado estándar	ASTM D422
Prueba de Proctor (compactación)	Determina la densidad máxima y el contenido óptimo de humedad en un suelo	ASTM D698
Prueba de penetración estándar (SPT)	Evalúa la resistencia del suelo mediante la cantidad de golpes para penetrar una muestra	ASTM D1586
Ensayo de corte directo	Mide la resistencia al corte de un suelo bajo condiciones controladas	ASTM D3080
FUENTE: ASTM International D4318, 2018		

3.2.4 Suelo

El suelo es un material natural que recubre la superficie terrestre y se forma a partir de la descomposición de las rocas. Este material es crucial en el diseño de cimientos y estructuras, ya que sus propiedades mecánicas, como la capacidad de carga y la resistencia a la compresión, determinan la estabilidad de las infraestructuras construidas sobre él (Villalobos, 2016).

(Duque y Escobar, 2002), el suelo se clasifica de acuerdo con sus características físicas y mecánicas, como la densidad y el contenido de agua. Estos factores afectan

la capacidad del suelo para resistir cargas estáticas y dinámicas, y determinan la viabilidad del diseño de cimientos, carreteras y presas. La correcta clasificación del suelo es esencial para evitar problemas de asentamientos o fallas estructurales.



FUENTE: Das, 2013, p. 71

Figura 2 — Fases del suelo

- a) **Fase Sólida:** Esta fase está compuesta por las partículas minerales y la materia orgánica que forman la estructura del suelo. Es fundamental para las propiedades mecánicas del suelo, como su capacidad de carga y resistencia (Verruijt, 2018).
- b) **Fase Líquida:** Esta fase se refiere al agua contenida en los poros del suelo. El contenido de agua influye en las propiedades del suelo, como su permeabilidad, resistencia al corte y comportamiento ante variaciones de humedad. El agua es crucial en la interacción entre las partículas del suelo y en los procesos de consolidación y expansión (Verruijt, 2018).
- c) **Fase Gaseosa:** Es la fase en la que el aire ocupa los espacios vacíos entre las partículas del suelo. Esta fase es importante porque determina la capacidad del suelo para intercambiar gases, lo que afecta la aeración del suelo y su comportamiento en términos de compactación y resistencia (Verruijt, 2018).

Tipo de suelo	Relación de vacíos, e	Contenido natural de humedad en un estado saturado (%)	Peso unitario seco, γ_d (kN/m ³)
Arena uniforme floja	0.8	30	14.5
Arena uniforme densa	0.45	16	18
Arena limosa angular de grano flojo	0.65	25	16
Arena limosa angular de grano denso	0.4	15	19
Arcilla dura	0.6	21	17
Arcilla blanda	0.9–1.4	30–50	11.5–14.5
Loess	0.9	25	13.5
Arcilla orgánica suave	2.5–3.2	90–120	6–8
Cajón glacial	0.3	10	21

FUENTE: Das, 2013, p. 76

Figura 3 — Relación de vacíos y contenido de humedad por tipo de suelo

3.2.5 Contenido de humedad - ASTM D2216

Es la cantidad de agua presente en el suelo en relación con su masa seca. Se expresa generalmente en porcentaje y se determina mediante pruebas que miden la cantidad de agua contenida en una muestra de suelo (Juárez y Rico, 2005).

El contenido de humedad es la proporción de agua presente en el suelo, que influye directamente en sus propiedades mecánicas y su capacidad para sustentar cargas (Alva, 2020).

Tabla 3 — Cálculo del contenido de humedad

Máximo tamaño de partícula (pasa el 100%)	Tamaño de malla estándar	Masa mínima recomendada de espécimen de ensayo húmedo para contenidos de humedad reportados	
		$a \pm 0,1\%$	$a \pm 1\%$
2 mm o menos	2,00 mm (N° 10)	20 g	20 g
4,75 mm	4,760 mm (N° 4)	100 g	20 g
9,5 mm	9,525 mm (3/8")	500 g	50 g
19,0 mm	19,050 mm (3/4")	2,5 kg	250 g
37,5 mm	38,1 mm (1 1/2")	10 kg	1 kg
75,0 mm	76,200 mm (3")	50 kg	5 kg

FUENTE: MTC, 2014, p. 45

Según la norma ASTM D2216-19, Según la norma ASTM D2216-19, el contenido de humedad se calcula en laboratorio utilizando el método de secado en horno, donde una muestra de suelo se seca a una temperatura de entre 105°C y 110°C hasta que su peso se estabilice.

$$W = \frac{\text{Peso de agua}}{\text{Peso de suelo secado al horno}} \times 100$$

$$W = \frac{M_{cws} - M_{cs}}{M_{cs} - M_c} \times 100 = \frac{M_w}{M_s} \times 100$$

Donde:

- W = es el contenido de humedad, (%)
- M_{cws} = es el peso del contenedor más el suelo húmedo, en gramos
- M_{cs} = es el peso del contenedor más el suelo secado en horno, en gramos
- M_c = es el peso del contenedor, en gramos
- M_w = es el peso del agua, en gramos
- M_s = es el peso de las partículas sólidas, en gramos

FUENTE: Das, 2013, p. 76

Figura 4 — Contenido de humedad

Existen varias formas de medir el **contenido de humedad** del suelo, y estas están generalmente reguladas por normativas que aseguran la precisión y fiabilidad de los resultados.

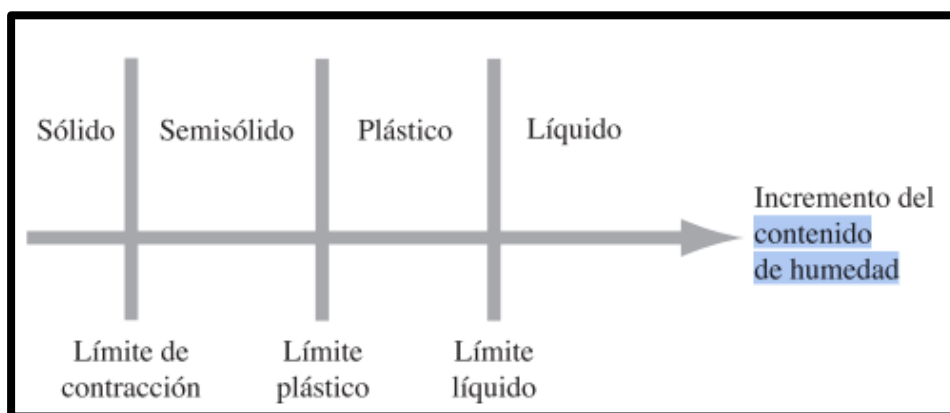
Tabla 4 — Métodos para determinar el contenido de humedad

Método	Descripción	Norma
Método de secado en horno	Consiste en secar una muestra de suelo en un horno a 105°C - 110°C hasta que alcance un peso constante. El contenido de humedad se calcula con la pérdida de peso.	ASTM D2216-19: Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass
Método de la estufa	Similar al método ASTM, la muestra de suelo se seca en una estufa a temperatura controlada hasta que toda el agua se haya evaporado.	ISO 17892-1:2014: Geotechnical investigation and testing — Laboratory testing of soil — Part 1: Determination of water content

Método del Carburo de Calcio	Utiliza una reacción química donde el carburo de calcio reacciona con el agua del suelo para liberar gas. El contenido de humedad se calcula a partir de la cantidad de gas producido.	ASTM D4944-18: Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil Using a Gas Pressure Method
Método de Reflectancia Infrarroja (NIR)	Mide la absorción de radiación infrarroja, relacionada con la cantidad de agua en el suelo. Se utiliza para mediciones rápidas en campo.	Varias normativas relacionadas con espectroscopía NIR
Método TDR (Reflectometría en el dominio del tiempo)	Mide la permitividad dieléctrica del suelo, que está relacionada con su contenido de agua. Es un método no destructivo usado en el campo.	ASTM D5554-10: Standard Test Method for Measuring the Dielectric Constant of Soil by Time Domain Reflectometry (TDR)
FUENTE: ASTM International e ISO, 2018		

3.2.6 Límites de Atterberg

Los límites de Atterberg son un conjunto de pruebas utilizadas para clasificar suelos finos (principalmente arcillas) según su comportamiento frente a cambios de humedad. Estos límites ayudan a determinar las propiedades de plasticidad y consistencia de los suelos, para la caracterización del suelo en términos de su comportamiento frente a cargas y variaciones de humedad (Lambe y Whitman, 2004).



FUENTE: Das, 2013, p. 85

Figura 5 — Límites de Atterberg

a) Límite Líquido (LL)

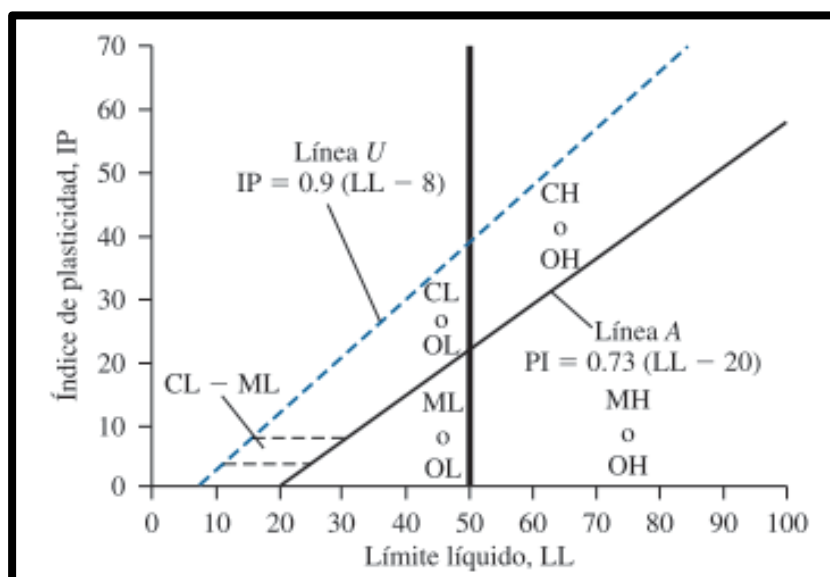
El límite líquido es el contenido de humedad en el que un suelo pasa de un estado líquido a un estado plástico. En otras palabras, es la humedad en la cual el suelo deja de fluir como un líquido y comienza a comportarse como una pasta. Este límite es un indicador de la plasticidad del suelo (Villalobos, 2016).

b) Límite Plástico (LP)

El límite plástico es el contenido de humedad en el que un suelo cambia de un estado plástico a un estado semisólido. Es el punto donde el suelo comienza a volverse lo suficientemente seco como para no deformarse de manera plástica bajo presión (Villalobos, 2016).

c) Índice de Plasticidad (IP)

El índice de plasticidad es la diferencia entre el límite líquido y el límite plástico, es decir, $IP = LL - LP$. Este índice mide la plasticidad del suelo; a mayor IP, mayor será la capacidad del suelo para comportarse plásticamente (Villalobos, 2016).



FUENTE: Braja M, 2013, p. 40

Figura 6 — Gráfica de plasticidad

3.2.7 Análisis granulométrico

Es el proceso que se utiliza para determinar la distribución del tamaño de las partículas de un suelo, generalmente mediante tamizado o técnicas de

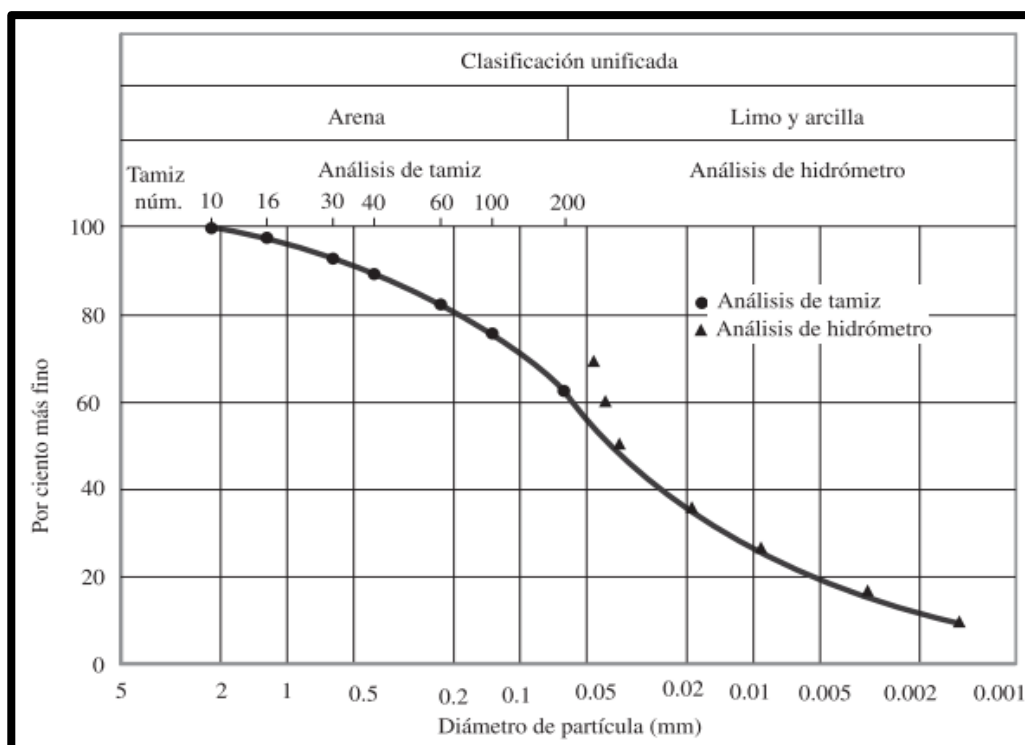
sedimentación. Este análisis es crucial para clasificar el suelo en función de su composición, lo que permite evaluar sus propiedades y comportamiento en diferentes condiciones (Juárez y Rico, 2005).

Este ensayo tiene como objetivo clasificar las partículas de un suelo según su tamaño, y se realiza mediante técnicas como el tamizado para partículas más grandes y la sedimentación para partículas finas. Los resultados permiten definir las propiedades mecánicas y de resistencia del suelo, siendo fundamental en la ingeniería civil para el diseño de cimientos y estructuras (Villalobos, 2016).

Tabla 5 — Tamices para el análisis granulométrico

TAMICES	ABERTURA (mm)
3"	75.000
2"	50.800
1 ½ "	38.100
1"	25.400
³ / ₄ "	19.000
3/8"	9.500
N° 4	4.760
N° 10	2.000
N° 20	0.840
N° 40	0.425
N° 60	0.260
N° 140	0.106
N° 200	0.075
FUENTE: MTC, 2014, p. 45	





FUENTE: Braja M, 2013, p. 60

Figura 7 — Curva de distribución de tamaño de partícula

Nombre de la organización	Tamaño de grano (mm)			
	Grava	Arena	Limo	Arcilla
Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)	>2	2 a 0.06	0.06 a 0.002	<0.002
Departamento de Agricultura de E.U. (USDA)	>2	2 a 0.05	0.05 a 0.002	<0.002
Asociación Americana de Carreteras Estatales y Oficiales del Transporte (AASHTO)	76.2 a 2	2 a 0.075	0.075 a 0.002	<0.002
Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (Cuerpo de Ingenieros del Ejército de E.U., Oficina de Reclamación de E.U., Sociedad Americana para Pruebas y Materiales)	76.2 a 4.75	4.75 a 0.075	Finos (p.ej., limos y arcillas) <0.075	

FUENTE: Braja M, 2013, p. 60

Figura 8 — Límites de separación por granulometría

3.2.8 Sistema de clasificación de suelos

El sistema de clasificación de suelos es un conjunto de normas y metodologías que permiten agrupar los suelos de acuerdo con sus propiedades físicas y mecánicas. Este sistema es fundamental, ya que ayuda a conocer cómo se comportarán los suelos en proyectos de construcción (Das, 2016).

a) Clasificación AASHTO

Este sistema, propuesto por la American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO), clasifica los suelos en grupos con base en su capacidad para soportar carga y su permeabilidad. Está diseñado principalmente para proyectos viales, de pavimentación y de carreteras (Castillo, 2005).

Tabla 6 — Grupos de clasificación AASHTO

Grupo AASHTO	Descripción	Norma ASTM
A-1	Suelos gruesos con alta capacidad portante (arena o grava).	ASTM D2487
A-2	Suelos granulares con capacidad intermedia.	ASTM D2487
A-3	Suelos finos con baja capacidad portante.	ASTM D2487
A-4	Suelos arcillosos con baja capacidad portante.	ASTM D2487
FUENTE: AASHTO M 145, 2018		

b) Sistema de clasificación según la SUCS (Unified Soil Classification System)

Este sistema es ampliamente utilizado en la ingeniería geotécnica y clasifica los suelos de acuerdo con su composición granulométrica (tamaño de las partículas) y comportamiento frente al agua. El sistema es útil para una gran variedad de proyectos de construcción y es una de las bases para el diseño de cimentaciones (Duque y Escobar, 2002).



Tabla 7 — Grupos de clasificación USCS

Grupo USCS	Descripción	Norma ASTM
GW	Grava bien graduada	ASTM D2487
GP	Grava mal graduada	ASTM D2487
SW	Arena bien graduada	ASTM D2487
SP	Arena mal graduada	ASTM D2487
CL	Arcilla de baja plasticidad	ASTM D2487
CH	Arcilla de alta plasticidad	ASTM D2487
ML	Limo de baja plasticidad	ASTM D2487

FUENTE: Braja M, 2013

Criterio para la asignación de símbolos de grupo				Símbolos de grupo
Suelos de grano grueso Más de 50% retenido en el tamiz núm. 200	Gravas Más de 50% de fracción gruesa retenida en el tamiz núm. 4	Gravas limpias Menos de 5% finos ^a	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 4$ y/o $1 > C_c > 3^c$	GW GP
		Gravas con finos Más de 12% finos ^{a,d}	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	GM GC
	Arenas 50% o más de la fracción gruesa pasa tamiz núm. 4	Arenas limpias Menos de 5% finos ^b	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3^c$ $C_u < 6$ y/o $1 > C_c > 3^c$	SW SP
		Arenas con finos Más de 12% finos ^{b,d}	$PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) $PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2)	SM SC
	Limos y arcillas Límite líquido menor que 50	Inorgánico	$PI > 7$ y gráficos en o por encima de línea "A" (figura 4.2) ^e $PI < 4$ o gráficos por debajo de línea "A" (figura 4.2) ^e	CL ML
		Orgánico	Límite líquido: secado Límite líquido: no secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OL	OL
Suelos de grano fino 50% o más pasa a través del tamiz núm. 200	Limos y arcillas Límite líquido 50 o más	Inorgánico	Gráficos PI en o por encima de línea "A" (figura 4.2) Gráficos PI por debajo de "A" línea (figura 4.2)	CH MH
		Orgánico	Límite líquido: secado Límite líquido: no secado < 0.75 ; vea la figura 4.2; zona OH	OH
	Suelos altamente orgánicos	Materia orgánica principalmente, color oscuro y orgánico		Pt

^aGravas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: GW-GM, GW-GC, GP-GM, GP-GC.
^bArenas con 5 a 12% de finos requieren símbolos dobles: SW-SM, SW-SC, SP-SM, SP-SC.
 $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}}$; $C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60} \times D_{10}}$
^dSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo GC-GM o SC-SM.
^eSi $4 \leq PI \leq 7$ y gráficos en la zona rayada en la figura 4.2, se usa doble símbolo CL-ML.

FUENTE: Braja M, 2013, p. 104

Figura 9 — Grupos de clasificación SUCS



Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
	A-1			A-2			
Grupo de clasificación	A-1-a	A-1-b	A-3	A-2-4	A-2-5	A-2-6	A-2-7
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10	50 máx.						
Núm. 40	30 máx.	50 máx.	51 mín.				
Núm. 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido				40 máx.	41 mín.	40 máx.	41 mín.
Índice de plasticidad	6 máx.		NP	10 máx.	10 máx.	11 mín.	11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes	Fragmentos de roca, grava y arena		Arena fina	Limo o grava arcillosa y arena			
Clasificación general de la subrasante	Excelente a bueno						

Clasificación general	Materiales granulares (35% o menos del total de la muestra pasada por el núm. 200)						
							A-7 A-7-5* A-7-6†
Grupo de clasificación		A-4	A-5	A-6			
Análisis de tamiz (porcentaje de paso)							
Núm. 10							
Núm. 40							
Núm. 200		36 mín.	36 mín.	36 mín.			36 mín.
Características de la fracción de paso núm. 40							
Límite líquido		40 máx.	41 mín.	40 máx.			41 mín.
Índice de plasticidad		10 máx.	10 máx.	11 mín.			11 mín.
Tipos comunes de materiales significativos constituyentes		Suelos limosos			Suelos arcillosos		
Clasificación general de la subrasante	Regular a malo						

*Para A-7-5, $PI \leq LL - 30$

†Para A-7-6, $PI > LL - 30$

FUENTE: Braja M, 2013, p. 100

Figura 10 — Grupos de clasificación AASHTO

3.2.9 Método Speedy (ASTM D4944)

El método Speedy constituye uno de los procedimientos de campo más utilizados para la determinación rápida del contenido de humedad del suelo. Su funcionamiento se basa en una reacción química entre el agua presente en la muestra y el carburo de calcio (CaC_2), reacción que genera gas acetileno (C_2H_2). La presión desarrollada por el gas dentro de una cámara sellada es proporcional a la cantidad de agua contenida en el suelo, permitiendo estimar el contenido de humedad mediante un manómetro previamente calibrado. Este procedimiento se encuentra normalizado en la ASTM D4944, siendo ampliamente empleado en proyectos de carreteras, terraplenes, presas y obras de movimiento de tierras debido a la rapidez con la que proporciona resultados (ASTM International, 2022).

La reacción química que sustenta el ensayo puede expresarse mediante la siguiente ecuación:



donde

- CaC_2 es el carburo de calcio;
- H_2O es el agua presente en la muestra de suelo;
- C_2H_2 es el acetileno, un gas que se genera durante la reacción;
- $\text{Ca}(\text{OH})_2$ es el hidróxido de calcio.

El carburo de calcio reacciona con el agua del suelo y produce acetileno, generando una presión que permite determinar el contenido de humedad.

En esta reacción, cada molécula de carburo de calcio consume agua para formar acetileno e hidróxido de calcio. La cantidad de acetileno producido incrementa la presión dentro del recipiente hermético, la cual es medida mediante un manómetro graduado que convierte directamente la presión en porcentaje de humedad. Debido a que la reacción es prácticamente inmediata, el método permite obtener resultados en pocos minutos sin necesidad de utilizar hornos de secado (Head, 2006).

El carburo de calcio (CaC_2) constituye el reactivo principal del método Speedy. Se presenta generalmente en forma de ampollas o cápsulas selladas para evitar su contacto con la humedad ambiental, debido a su elevada reactividad con el agua.



Cuando el reactivo entra en contacto con la muestra de suelo húmedo, se inicia inmediatamente la generación de gas acetileno, proceso que permite cuantificar indirectamente el contenido de agua presente en la muestra (ASTM Internacional, 2022).

Desde el punto de vista operativo, el carburo de calcio requiere un manejo cuidadoso debido a que el acetileno producido es un gas inflamable. Por esta razón, la norma ASTM D4944 establece recomendaciones específicas sobre almacenamiento, manipulación y eliminación de residuos del reactivo, así como la necesidad de evitar fuentes de ignición durante la ejecución del ensayo. Asimismo, la precisión del método depende de la pureza del carburo de calcio y del adecuado estado de conservación de las ampollas utilizadas (Head, 2006).

El método Speedy presenta numerosas ventajas que explican su amplia utilización en el control de calidad de obras civiles. Su principal beneficio radica en la rapidez, ya que permite determinar el contenido de humedad en aproximadamente 3 a 5 minutos, mientras que el método gravimétrico requiere varias horas de secado en horno. Esta característica facilita la toma inmediata de decisiones durante los procesos de compactación, reduciendo tiempos de espera y mejorando la eficiencia de las actividades constructivas (ASTM International, 2022).

El Método de prueba ASTM D4944-18 describe un procedimiento para determinar el contenido de agua (humedad) en el suelo utilizando carburo de calcio como reactivo. Este método se basa en la reacción química entre el carburo de calcio y el agua presente en el suelo, lo que genera gas acetileno. Este gas se mide utilizando un manómetro calibrado, y la lectura del manómetro se usa para calcular el contenido de agua en el suelo. Aunque este método es más rápido y adecuado para pruebas en el campo, no está destinado a reemplazar el Método D2216, que se utiliza para obtener resultados más precisos en laboratorio. El Método ASTM D4944-18 es particularmente útil cuando no es práctico usar un horno o cuando los resultados rápidos son necesarios ASTM-D4944-18



FUENTE: UTEST, 2024

Figura 11 — Medidor de humedad tipo Speedy

3.2.9.1 Equipo necesario

Para llevar a cabo el procedimiento, se requieren los siguientes equipos:

- Cámara de prueba con manómetro: Mide la presión del gas generado durante la reacción.
- Básculas electrónicas o manuales: Para pesar con precisión la muestra de suelo.
- Bolitas de acero: Ayudan en la agitación y la trituration del suelo para asegurar que toda el agua disponible entre en contacto con el carburo de calcio.
- Tamiz de 4.75 mm (tamiz N°4): Para asegurar que las partículas del suelo sean suficientemente pequeñas y adecuadas para la prueba.
- Carburo de calcio: Reactivo utilizado que debe estar en condiciones adecuadas para producir gas acetileno al reaccionar con el agua del suelo ASTM-D4944-18.

3.2.9.2 Preparación de la muestra

- Se coloca un volumen específico de carburo de calcio en la cámara de prueba, junto con las bolas de acero.
- Se agrega una muestra representativa de suelo que debe ser homogénea y tener partículas menores a 4.75 mm. La masa de la muestra debe estar dentro de los límites especificados por el equipo de prueba.

- La masa de la muestra se debe medir con precisión utilizando una balanza electrónica o manual ASTM-D4944-18.

3.2.9.3 Proceso de reacción

- Una vez que la muestra de suelo y el reactivo se encuentran en la cámara de prueba, el aparato se agita vigorosamente. El movimiento rotatorio asegura que el carburo de calcio reaccione con toda el agua disponible en el suelo.
- Durante la agitación, el gas acetileno es liberado. La cantidad de gas generado es proporcional a la cantidad de agua en la muestra de suelo.
- El tiempo de agitación debe ser suficiente:
- Para arenas: mínimo 1 minuto.
- Para limos: hasta 2 minutos.
- Para arcillas: hasta 3 minutos o más, según la plasticidad del suelo ASTM-D4944-18.

3.2.9.4 Lectura del manómetro

- Una vez que la agitación ha terminado, se observa la lectura del manómetro. Cuando la aguja del manómetro se estabiliza, se obtiene la lectura final.
- Si la lectura del manómetro alcanza el límite del indicador, es necesario realizar la prueba nuevamente utilizando una muestra más grande (el doble de la masa recomendada). En este caso, la lectura final debe multiplicarse por dos para calcular el contenido de agua ASTM-D4944-18.

3.2.9.5 Calibración

- Curva de calibración: Se debe generar una curva de calibración utilizando el Método D2216. Esta curva correlaciona las lecturas del manómetro con el contenido de agua conocido de las muestras de suelo.
- Si los resultados obtenidos en una serie de pruebas caen fuera de la curva de calibración, se debe realizar una nueva curva para asegurar la precisión de los resultados.

- Es necesario calibrar periódicamente el aparato, especialmente si se utiliza un nuevo lote de reactivo. Las variaciones en los resultados deben estar dentro de un 1% para que la curva de calibración sea válida ASTM-D4944-18.

3.2.10 Método al horno (ASTM D2216)

El método de secado al horno establecido en la norma ASTM D2216 constituye el procedimiento de referencia internacional para determinar el contenido de humedad gravimétrica de suelos y rocas en laboratorio. Su principio se basa en cuantificar la pérdida de masa experimentada por una muestra después de ser sometida a un proceso de secado controlado en horno, asumiendo que dicha disminución corresponde al agua contenida en los poros del material. Debido a su elevada precisión y reproducibilidad, este método es ampliamente utilizado en estudios geotécnicos, ingeniería civil, mecánica de suelos y control de calidad de materiales, siendo considerado el patrón de comparación para la calibración y validación de métodos indirectos de medición de humedad, como los sensores electrónicos y los equipos portátiles de campo (ASTM International, 2019).

De acuerdo con la norma ASTM D2216, el contenido de humedad se define como la relación entre la masa del agua presente en la muestra y la masa del suelo seco, expresada en porcentaje. Para ello, una porción representativa del suelo se coloca en un recipiente previamente pesado y posteriormente se introduce en un horno de secado a una temperatura de 110 ± 5 °C hasta alcanzar masa constante. Una vez finalizado el secado, la muestra se enfría en un desecador para evitar la absorción de humedad del ambiente y se determina nuevamente su masa mediante una balanza de precisión. La diferencia entre la masa inicial y la masa final corresponde a la cantidad de agua evaporada durante el ensayo (ASTM International, 2019).

El contenido de humedad gravimétrica se calculó mediante la fórmula (1):

$$w = \frac{M_h - M_s}{M_s} \times 100 \quad (2)$$

donde

w es el contenido de humedad, expresado en porcentaje (%);
 M_h es la masa del suelo húmedo, expresado en gramos (g);



M_s es la masa del suelo seco después del secado en horno, expresado en gramos (g).

Esta ecuación representa el fundamento de prácticamente todos los ensayos geotécnicos relacionados con la caracterización física del suelo, debido a que parámetros como los límites de Atterberg, la compactación Proctor, la densidad seca y la capacidad portante dependen directamente de la determinación precisa del contenido de humedad (ASTM International, 2019).

Una de las principales ventajas del método ASTM D2216 es su elevada exactitud, ya que determina directamente la cantidad de agua presente en el suelo sin depender de propiedades eléctricas, electromagnéticas o dieléctricas que puedan variar según el tipo de material. Por esta razón, la mayoría de investigaciones relacionadas con sensores electrónicos de humedad utilizan este procedimiento como método patrón para desarrollar curvas de calibración y validar la confiabilidad de nuevos dispositivos de medición. Asimismo, la metodología es aplicable a una amplia variedad de suelos minerales, permitiendo obtener resultados altamente reproducibles cuando se siguen estrictamente las condiciones de ensayo establecidas por la norma (Schwamback et al., 2023; ASTM International, 2019).

El método presenta algunas limitaciones operativas. El tiempo requerido para completar el ensayo puede oscilar entre 16 y 24 horas, dependiendo del tipo de suelo y de la cantidad de humedad presente, lo que dificulta su utilización cuando se requieren resultados inmediatos durante trabajos de campo. Además, en suelos con elevado contenido de materia orgánica o minerales hidratados, la temperatura estándar de secado puede provocar pérdidas adicionales de masa por descomposición o deshidratación estructural, generando ligeras sobreestimaciones del contenido de humedad. Por ello, la propia norma recomienda emplear temperaturas menores en materiales especiales, como suelos altamente orgánicos o con presencia significativa de yeso, con el fin de minimizar dichos efectos (ASTM International, 2019).

En investigaciones recientes orientadas al desarrollo de tecnologías de medición rápida, el método ASTM D2216 continúa utilizándose como referencia para evaluar la exactitud de sensores electrónicos, analizadores halógenos, equipos Speedy y

sistemas basados en Arduino. Aunque estas tecnologías reducen considerablemente el tiempo de medición, la comparación frente al método de secado al horno sigue siendo indispensable para determinar errores de medición, coeficientes de correlación y ecuaciones de calibración. En consecuencia, el método ASTM D2216 mantiene su condición de estándar de referencia para la validación experimental de nuevas tecnologías destinadas a la determinación del contenido de humedad del suelo (Mohammad et al., 2021; ASTM International, 2019).

3.2.11 Sistema basado en Arduino para medición del contenido de humedad del suelo

Los sistemas de medición del contenido de humedad del suelo basados en plataformas de hardware libre han adquirido una importancia significativa durante los últimos años debido a su bajo costo, facilidad de implementación y elevada capacidad de integración con sensores analógicos y digitales. Entre estas plataformas, Arduino se ha consolidado como una de las alternativas más utilizadas en aplicaciones de monitoreo ambiental, agricultura de precisión, ingeniería geotécnica e Internet de las Cosas (IoT), debido a que permite adquirir, procesar y almacenar información proveniente de diversos sensores con suficiente precisión para aplicaciones de campo. Su arquitectura abierta facilita el desarrollo de sistemas personalizados capaces de adaptarse a diferentes condiciones de operación, convirtiéndose en una herramienta ampliamente empleada tanto en investigación científica como en aplicaciones profesionales. Investigaciones recientes evidencian que Arduino constituye una plataforma confiable para sistemas de monitoreo de humedad cuando es correctamente calibrada frente a métodos de referencia como el método gravimétrico (Schwamback et al., 2023).

Desde el punto de vista electrónico, un sistema basado en Arduino está conformado por una placa microcontroladora (generalmente Arduino Uno o Arduino Nano), un sensor de humedad del suelo, un sistema de alimentación eléctrica y un programa desarrollado en el entorno Arduino IDE. El microcontrolador recibe la señal analógica generada por el sensor, la convierte mediante un convertidor analógico-digital (ADC) de 10 bits y posteriormente procesa dicha información para obtener valores proporcionales al contenido de humedad del suelo. Dependiendo del algoritmo implementado, los valores pueden visualizarse en una pantalla LCD, almacenarse en memorias externas o transmitirse inalámbricamente mediante

módulos Wi-Fi, Bluetooth o LoRa hacia plataformas de monitoreo remoto. Esta flexibilidad tecnológica ha favorecido su utilización en sistemas inteligentes de adquisición de datos en tiempo real (Schwamback et al., 2023).

El principio de funcionamiento del sistema depende principalmente del tipo de sensor empleado. Los sensores resistivos, como el HW-080 o YL-69, estiman la humedad a partir de la variación de la resistencia eléctrica entre dos electrodos insertados en el suelo. Cuando aumenta el contenido de agua, la conductividad eléctrica del suelo también aumenta, disminuyendo la resistencia medida por el sensor. En cambio, los sensores capacitivos determinan la humedad mediante las variaciones de la constante dieléctrica del suelo, evitando el contacto eléctrico directo y reduciendo significativamente los problemas de corrosión. Aunque ambos tipos presentan ventajas y limitaciones, diversos estudios recientes muestran que los sensores capacitivos presentan mayor estabilidad durante periodos prolongados de operación, mientras que los sensores resistivos continúan siendo ampliamente utilizados debido a su reducido costo y facilidad de integración con Arduino en aplicaciones experimentales y educativas (Al-Rawi et al., 2024).

En aplicaciones geotécnicas, el uso de sistemas basados en Arduino representa una alternativa prometedora para realizar mediciones rápidas del contenido de humedad del suelo directamente en campo. A diferencia de los métodos convencionales, como el método gravimétrico por secado en horno o el método Speedy, estos sistemas permiten obtener resultados prácticamente en tiempo real sin alterar significativamente la muestra de suelo. No obstante, diversos investigadores coinciden en que la precisión del sistema depende de una adecuada calibración para cada tipo de suelo, debido a que factores como la textura, densidad, contenido de sales, temperatura y materia orgánica modifican la respuesta eléctrica del sensor. Por ello, la calibración mediante regresión estadística frente al método gravimétrico continúa siendo una etapa indispensable para garantizar mediciones confiables (Suhartono et al., 2025).

Uno de los principales aportes de la tecnología Arduino radica en la posibilidad de desarrollar equipos portátiles de bajo costo para monitoreo continuo del contenido de humedad. Diversas investigaciones reportan que estos sistemas presentan errores

aceptables cuando son correctamente calibrados, alcanzando niveles de exactitud superiores al 90 % bajo determinadas condiciones experimentales. Asimismo, su reducido consumo energético permite alimentarlos mediante baterías o paneles solares, favoreciendo su utilización en zonas rurales, proyectos de investigación y obras civiles donde el acceso a equipos comerciales resulta limitado. Estas características convierten a Arduino en una plataforma adecuada para desarrollar instrumentos de medición accesibles sin sacrificar significativamente la calidad de los datos obtenidos (Pitoro et al., 2025).

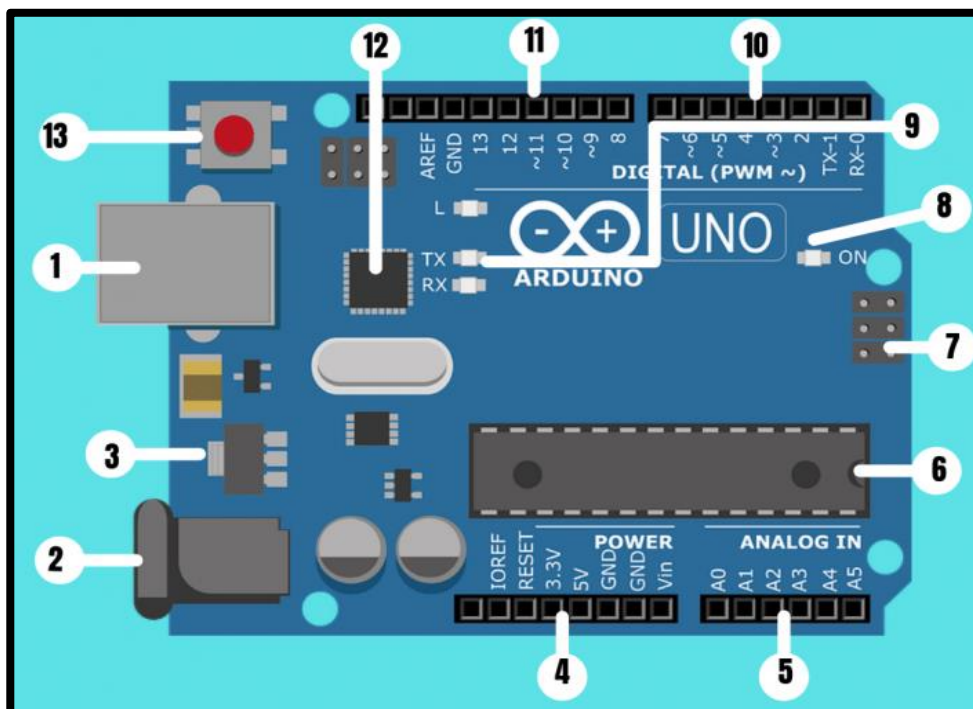
En los últimos años, la evolución de los sistemas basados en Arduino ha estado estrechamente vinculada con el desarrollo del Internet de las Cosas (IoT), permitiendo transmitir información hacia servidores en la nube para su almacenamiento, análisis y visualización remota. Esta integración facilita el monitoreo permanente del comportamiento hídrico del suelo, el establecimiento de sistemas automáticos de alerta y el control de procesos mediante actuadores, contribuyendo tanto a la agricultura inteligente como a la gestión de infraestructura civil. En consecuencia, los sistemas Arduino representan actualmente una alternativa tecnológica eficiente para investigaciones orientadas al desarrollo de instrumentos portátiles de medición del contenido de humedad del suelo, especialmente cuando se busca combinar bajo costo, facilidad de implementación y resultados comparables con métodos tradicionales mediante procesos adecuados de calibración (Osanaiye et al., 2021; Yu et al., 2021).

Un microcontrolador Arduino es una plataforma de prototipado electrónico de código abierto. En su forma más básica, un microcontrolador es el "cerebro" del proyecto, responsable de leer entradas (como sensores) y controlar salidas (como motores, luces o pantallas). Arduino incluye un software llamado IDE de Arduino, que permite programar el microcontrolador con facilidad, usando un lenguaje de programación simple basado en C/C++ (Alfaiot, 2024).

(Arduino, 2024). Arduino no es solo un microcontrolador o un conjunto de componentes electrónicos, sino también una plataforma de prototipado electrónico que permite a los usuarios diseñar y desarrollar proyectos interactivos de manera rápida y eficiente. Es una solución de código abierto que incluye tanto hardware



(placas de desarrollo) como software (IDE para programar y compilar los programas para los microcontroladores).



FUENTE: AULA21, 2024

Figura 12 — Microcontrolador Arduino

3.2.11.1 Características principales

- Microcontrolador ATmega328P (comúnmente usado en placas como el Arduino Uno) (Aula21, 2024).
- Puertos de entrada y salida (I/O) que permiten conectar sensores, actuadores y otros dispositivos electrónicos (Aula21, 2024).
- Puertos de comunicación como USB, que se utiliza para cargar programas al microcontrolador (Aula21, 2024).
- Placa de fácil uso, especialmente diseñada para facilitar el aprendizaje y el desarrollo de proyectos electrónicos (Aula21, 2024).

3.2.11.2 Funcionamiento de un microcontrolador Arduino

- **Lectura de Sensores:** Un sensor de humedad (por ejemplo, un sensor de humedad del suelo) puede conectarse a una de las entradas del Arduino, que lee las señales eléctricas enviadas por el sensor (Alfaiot, 2024).

- **Procesamiento de Datos:** El microcontrolador procesa los datos utilizando el programa que se cargó previamente en él a través del IDE de Arduino (Alfaiot, 2024).
- **Control de Actuadores:** Con base en el procesamiento de los datos, el Arduino puede controlar otros componentes, como encender una bomba de agua o mostrar los resultados en una pantalla LCD (Alfaiot, 2024).

3.2.11.3 Componentes principales de un microprocesador Arduino

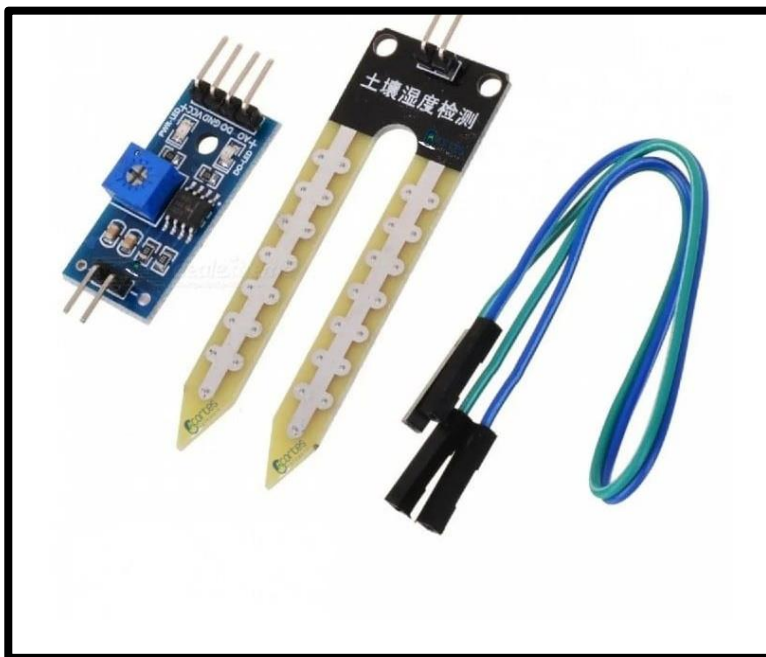
Los microprocesadores en las placas de Arduino suelen ser de la familia ATmega (desarrollados por Atmel, ahora parte de Microchip). Los modelos más comunes son el ATmega328P y ATmega2560, que se encuentran en placas como el Arduino Uno y el Arduino Mega, respectivamente. Estos microprocesadores tienen las siguientes características clave (Alfaiot, 2024).

- CPU (Unidad Central de Procesamiento):** Es el "cerebro" del microprocesador, donde se ejecutan las instrucciones del programa.
- Memoria Flash:** Es la memoria donde se almacenan los programas cargados en el microcontrolador. En el caso del ATmega328P, tiene 32 KB de memoria flash.
- Memoria SRAM:** Se utiliza para almacenar variables temporales durante la ejecución del programa. En el ATmega328P, tiene 2 KB de SRAM.
- Memoria EEPROM:** Permite almacenar datos de manera permanente (no volátil), incluso cuando el microcontrolador está apagado. El ATmega328P tiene 1 KB de EEPROM.
- Puertos de Entrada/Salida (I/O):** Los microprocesadores de Arduino tienen varios pines que pueden configurarse como entradas o salidas, y permiten interactuar con sensores, pantallas, botones y otros dispositivos electrónicos.



3.2.12 Sensor HW-080

El sensor HW-080 es un componente electrónico empleado para la estimación del contenido de humedad presente en el suelo a partir de la respuesta eléctrica generada entre sus terminales conductoras. Su implementación en sistemas basados en microcontroladores, como Arduino, facilita la obtención de lecturas en tiempo real durante trabajos de campo, permitiendo disponer de una herramienta práctica y accesible para la evaluación de las condiciones de humedad de suelo.



FUENTE: Acortes, 2027

Figura 13 — Sensor HW-080

3.2.12.1 Características del sensor HW-080

El sensor HW-080 es un dispositivo electrónico de bajo costo diseñado para estimar el contenido de humedad del suelo mediante la medición de su conductividad eléctrica. Su funcionamiento se basa en el principio de que la resistencia eléctrica del suelo disminuye conforme aumenta el contenido de agua entre las partículas del suelo. Cuando las dos sondas metálicas del sensor se insertan en el terreno, la corriente eléctrica fluye con mayor facilidad en suelos húmedos que en suelos secos, generando una variación de voltaje proporcional al nivel de humedad. Debido a su simplicidad de diseño, facilidad de integración con plataformas de hardware libre y reducido costo de adquisición, el HW-080 ha sido ampliamente empleado en proyectos de automatización, agricultura de precisión, monitoreo

ambiental e investigaciones experimentales relacionadas con la medición de humedad del suelo (Chowdhury; Sen; Janardhanan, 2022).

El módulo HW-080 está conformado por dos componentes principales: la sonda de detección y la tarjeta electrónica de acondicionamiento de señal. La sonda posee dos electrodos metálicos que se introducen directamente en el suelo para medir la conductividad eléctrica, mientras que la tarjeta incorpora un comparador de voltaje LM393, encargado de procesar la señal proveniente de la sonda y proporcionar simultáneamente una salida analógica (AO) y una salida digital (DO). La salida analógica permite obtener una lectura continua del nivel de humedad, mientras que la salida digital genera una señal binaria de acuerdo con un umbral previamente ajustado mediante un potenciómetro incorporado en el módulo, facilitando su integración con microcontroladores como Arduino Uno, Arduino Nano, ESP32 y otros sistemas embebidos (Circuit Designer, 2024; PCBSYNC, 2025).

Entre las principales especificaciones técnicas del sensor HW-080 destacan su tensión de alimentación de 3,3 a 5 V DC, compatibilidad con niveles lógicos de microcontroladores comerciales, consumo reducido de corriente y disponibilidad de cuatro terminales de conexión (VCC, GND, AO y DO). El sensor entrega valores analógicos comprendidos entre 0 y aproximadamente 1023 cuando es utilizado con el convertidor analógico-digital de 10 bits del Arduino Uno, permitiendo obtener una resolución adecuada para procesos de calibración frente al método gravimétrico. Asimismo, el módulo incorpora indicadores LED para alimentación y estado de la salida digital, facilitando las tareas de configuración y verificación durante la implementación experimental (Circuit Designer, 2024; PCBSYNC, 2025).

Una de las principales ventajas del sensor HW-080 es su facilidad de implementación en sistemas de adquisición de datos de bajo costo, permitiendo desarrollar equipos portátiles para la medición de humedad in situ. Su compatibilidad con la plataforma Arduino facilita el procesamiento

inmediato de las señales, el almacenamiento de información y la transmisión inalámbrica mediante tecnologías como Wi-Fi, Bluetooth o LoRa. Además, su reducido costo favorece el desarrollo de investigaciones experimentales, especialmente en instituciones académicas donde el acceso a equipos comerciales de alta precisión puede resultar limitado (Schwamback et al., 2023).

No obstante, el sensor HW-080 también presenta algunas limitaciones que deben considerarse durante su utilización. Debido a que emplea electrodos metálicos en contacto directo con el suelo, la exposición prolongada a ambientes húmedos favorece procesos de corrosión y oxidación que pueden modificar progresivamente la respuesta eléctrica del sensor, afectando la estabilidad de las mediciones. Asimismo, variables como la salinidad, la temperatura, la densidad del suelo, la textura y el contenido de materia orgánica pueden influir significativamente sobre la conductividad eléctrica del medio, por lo que diversos estudios recomiendan realizar una calibración específica para cada tipo de suelo utilizando como referencia el método gravimétrico antes de emplearlo en aplicaciones de ingeniería o investigación científica (Chowdhury; Sen; Janardhanan, 2022).

En consecuencia, el sensor HW-080 constituye una alternativa tecnológica adecuada para el desarrollo de prototipos de medición rápida del contenido de humedad del suelo cuando se requiere una solución económica, portátil y de fácil integración con sistemas basados en Arduino. Sin embargo, para garantizar resultados confiables en aplicaciones geotécnicas y de ingeniería civil, es indispensable efectuar procesos de calibración y validación experimental frente a métodos normalizados, de manera que la respuesta eléctrica del sensor pueda transformarse en valores reales de contenido de humedad mediante modelos matemáticos o ecuaciones de regresión (Schwamback et al., 2023; Chowdhury; Sen; Janardhanan, 2022).

3.3 Marco conceptual

- a) **Contenido de humedad del suelo:** Es la cantidad de agua contenida en el suelo, fundamental para determinar su capacidad de retención de agua, permeabilidad y



comportamiento ante cargas. Este valor es crucial para el diseño de cimientos y otras infraestructuras (Glosario de terminos, 2013).

- b) **Microcontrolador:** Dispositivo electrónico que permite controlar, procesar y gestionar sensores, como el HW-080, para medir el contenido de humedad del suelo en tiempo real (Arduino, 2024).
- c) **Sensor HW-080:** El sensor HW-080 es un módulo electrónico de bajo costo utilizado para estimar el contenido de humedad del suelo mediante el principio de conductividad o resistencia eléctrica entre dos electrodos metálicos insertados en el suelo. Su funcionamiento se basa en que la resistencia eléctrica disminuye a medida que aumenta el contenido de agua, generando una señal analógica que puede ser adquirida por un microcontrolador, como Arduino, para el monitoreo en tiempo real. Este tipo de sensor es ampliamente empleado en sistemas de riego automatizado, agricultura de precisión y proyectos de investigación debido a su facilidad de integración, bajo consumo energético y rápida respuesta; sin embargo, requiere calibración según el tipo de suelo y sus electrodos pueden experimentar corrosión durante un uso prolongado, lo que puede afectar la precisión de las mediciones (Chowdhury; Sen; Janardhanan, 2022; Handson Technology, 2019).
- d) **Método Speedy:** Técnica de campo para medir el contenido de humedad del suelo mediante una reacción química con carburo de calcio, que produce gas cuya presión es utilizada para calcular la cantidad de agua en una muestra de suelo (ASTM D4944, 2018).
- e) **Humedad volumétrica:** Representa la cantidad de agua por unidad de volumen de suelo, importante para la evaluación de la capacidad de retención de agua en suelos para diferentes tipos de proyectos de construcción y agrícolas (Glosario de términos, 2013).
- f) **Método de secado en horno:** Método estándar utilizado para medir el contenido de humedad en el laboratorio, donde una muestra de suelo se seca en un horno a temperatura constante para determinar la cantidad de agua presente (MTC ensayos, 2016).



- g) **Temperatura y humedad relativa:** Variables clave que influyen en las mediciones de humedad del suelo. Estos factores pueden afectar la exactitud de los sensores y deben ser controlados durante la medición (MTC ensayos, 2016).
- h) **Sistemas de monitoreo en tiempo real:** Sistemas basados en microcontroladores y sensores que permiten medir y registrar las condiciones del suelo continuamente (Arduino, 2024).
- i) **Ensayos de campo:** Pruebas realizadas en el sitio donde se mide el contenido de humedad del suelo utilizando el método Speedy para obtener datos sobre las condiciones del suelo en condiciones reales (MTC ensayos, 2016).
- j) **Capacidad de retención de agua:** Propiedad del suelo que indica su capacidad para mantener agua, lo cual es crucial en la planificación de infraestructuras como carreteras, cimientos y sistemas de drenaje (MTC ensayos, 2016).



CAPÍTULO IV METODOLOGÍA

4.1 Tipo y nivel de investigación

4.1.1 Tipo de investigación

La presente investigación corresponde al **tipo aplicada**, debido a que estuvo orientada a evaluar la confiabilidad de un sistema basado en Arduino con sensor HW-080 para la determinación del contenido de humedad del suelo *in situ*, mediante su comparación con los métodos de referencia ASTM D2216 (método al horno) y ASTM D4944 (método Speedy). Este tipo de investigación se caracteriza por utilizar los conocimientos científicos existentes para resolver problemas concretos y generar soluciones con aplicación práctica, contribuyendo al perfeccionamiento de procedimientos, productos o tecnologías en un contexto específico. En ese sentido, el estudio 51 busca aportar evidencia técnica sobre la viabilidad del sistema propuesto como alternativa para el control del contenido de humedad del suelo en obras de ingeniería civil, favoreciendo la optimización de los procesos de control geotécnico y la toma oportuna de decisiones durante la ejecución de proyectos de infraestructura. Esta clasificación se sustenta en lo establecido por la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE, 2018), que define la investigación aplicada como aquella destinada a generar nuevos conocimientos dirigidos principalmente hacia un objetivo práctico específico.

4.1.2 Nivel de investigación

La investigación corresponde al **nivel explicativo**, debido a que busca evaluar el comportamiento del sistema basado en Arduino con sensor HW-080 para determinar el contenido de humedad del suelo *in situ* y explicar su grado de confiabilidad mediante la comparación de los resultados obtenidos con los métodos de referencia ASTM D2216 (método al horno) y ASTM D4944 (método Speedy). En este nivel, la investigación no se limita a describir las mediciones obtenidas, sino que pretende explicar las diferencias o similitudes entre los métodos de



medición a partir del análisis de indicadores como la correlación, la precisión, la reproducibilidad, el error porcentual, el sesgo y la capacidad de estimación, permitiendo establecer si el sistema desarrollado constituye un prototipo preliminar con potencial de estimación en las condiciones evaluadas técnicamente confiable para la determinación del contenido de humedad del suelo. En este sentido, el nivel explicativo permite comprender las causas que originan las variaciones observadas entre los métodos de medición y fundamentar científicamente la validez del sistema propuesto para su aplicación en el control geotécnico de obras civiles (Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018; Bernal, 2022).

4.2 Diseño de la investigación

El diseño de investigación fue experimental, de tipo comparativo, orientado a evaluar el desempeño de dos métodos de determinación del contenido de humedad del suelo bajo condiciones de medición definidas. En este marco, se trabajó con un diseño unifactorial (método de medición) con dos niveles: (i) sistema con microcontrolador Arduino y sensor HW-080, y (ii) método Speedy como procedimiento de referencia.

El procedimiento consistió en aplicar ambos métodos a las mismas muestras de suelo, bajo condiciones controladas de ensayo (preparación de muestra, tiempos de lectura, temperatura ambiente de medición y número de repeticiones), con el propósito de asegurar la comparabilidad. Los datos obtenidos se registraron de forma sistemática para estimar indicadores de desempeño del sistema propuesto respecto del método Speedy, tales como diferencia media, error absoluto, dispersión repetibilidad y grado de correlación entre lecturas. Con ello, el diseño permitió describir el comportamiento de cada método y sustentar técnicamente las diferencias o similitudes observadas en la medición de la humedad del suelo.

4.2.1 El diseño experimental

La investigación adoptó un **diseño experimental de comparación y validación de métodos de medición**, debido a que se evaluó el desempeño de un sistema basado en Arduino con sensor HW-080 mediante la aplicación de un procedimiento experimental controlado y su comparación con los métodos de referencia ASTM D2216 (método al horno) y ASTM D4944 (método Speedy). Este diseño permitió aplicar los tres métodos de medición sobre las mismas muestras de suelo,



garantizando que las diferencias observadas correspondieran exclusivamente al método utilizado y no a variaciones inherentes al material ensayado.

Asimismo, el estudio contempló la manipulación del factor experimental, representado por el método de medición del contenido de humedad del suelo, cuyos niveles correspondieron al sistema basado en Arduino con sensor HW-080, el método gravimétrico ASTM D2216 y el método Speedy ASTM D4944. La variable de respuesta estuvo constituida por la confiabilidad de la medición, evaluada mediante indicadores de correlación, precisión, reproducibilidad, error porcentual, sesgo y capacidad de estimación, los cuales permitieron establecer el grado de concordancia entre el sistema propuesto y los métodos de referencia.

El diseño experimental permitió controlar las condiciones de ensayo, aplicar el mismo procedimiento de medición sobre cada muestra y reducir la influencia de factores externos que pudieran afectar los resultados obtenidos. De esta manera, fue posible comparar objetivamente el desempeño del sistema Arduino respecto a los métodos normalizados, garantizando la validez de las inferencias realizadas y proporcionando evidencia técnica sobre su aplicabilidad para la determinación del contenido de humedad del suelo en condiciones de campo (Montgomery, 2020; Hernández-Sampieri y Mendoza, 2018).

4.3 Descripción ética de la investigación

La investigación se ejecutó conforme a los principios de integridad y responsabilidad científica establecidos por la Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac, tomando como marco el Código de Ética para la Investigación difundido por el Vicerrectorado de Investigación y la referencia institucional del Comité de Ética para la Investigación formalizado mediante resolución rectoral; en ese sentido, al tratarse de un estudio experimental con muestras de suelo y sin participación de seres humanos ni animales, se priorizó la seguridad en el manejo de equipos e insumos, el registro veraz.

4.4 Población y muestra

- **Delimitación espacial**

La investigación se desarrolló en la progresiva 1+500 del tramo de la carretera de trocha carrozable Taraccasa, ubicada en el distrito y provincia de Abancay, departamento de



Apurímac, Perú. En este sector se ejecutaron las calicatas para la extracción de las muestras de suelo utilizadas en la investigación y se realizaron los ensayos experimentales de determinación del contenido de humedad.

- **Delimitación temporal**

El estudio comprendió el periodo correspondiente al año 2025, durante el cual se efectuaron las actividades de prospección geotécnica, extracción de muestras, mediciones de humedad mediante los tres métodos evaluados, procesamiento estadístico de la información y análisis de los resultados.

- **Delimitación temática**

La investigación se circunscribió a la evaluación de la confiabilidad del sistema basado en Arduino con sensor HW-080 para la determinación del contenido de humedad del suelo *in situ*, mediante su comparación con los métodos de referencia al horno y Speedy. El estudio abordó específicamente el análisis de la correlación entre los métodos, la comparación estadística de las mediciones, la precisión, la reproducibilidad, el sesgo y la capacidad de estimación.

- **Población**

La población de estudio estuvo constituida por el suelo de subrasante existente en la progresiva 1+500 del tramo de la carretera de trocha carrozable Taraccasa, ubicada en Abancay, región Apurímac, cuyas características geotécnicas permitieron evaluar el contenido de humedad *in situ*. Esta población comprendió el material de suelo susceptible de ser extraído mediante calicatas y analizado mediante el sistema Arduino con sensor HW-080, el método al horno ASTM D2216 y el método Speedy ASTM D4944.

- **Muestra**

La muestra estuvo conformada por cuatro muestras de suelo procedentes de cuatro calicatas ejecutadas en el sector correspondiente a la progresiva 1+500 del tramo de la carretera de trocha carrozable Taraccasa, Abancay–Apurímac. Las muestras fueron seleccionadas mediante un muestreo no probabilístico intencional o por criterio técnico, considerando la accesibilidad del terreno, la representatividad del suelo de subrasante y las condiciones necesarias para efectuar los ensayos de contenido de humedad.

Cada una de las cuatro muestras fue evaluada mediante tres procedimientos: el sistema Arduino con sensor HW-080, el método al horno ASTM D2216 y el método Speedy ASTM D4944. Las determinaciones se realizaron por triplicado para cada método, obteniéndose 12 mediciones por método y un total de 36 determinaciones experimentales.

4.5 Procedimiento

- **Planificación y delimitación del estudio**

Se definió el área de evaluación, los criterios de selección de puntos de muestreo (representatividad del suelo, accesibilidad y homogeneidad) y el protocolo de registro (código de muestra, ubicación, fecha/hora y condiciones ambientales).

- **Selección de componentes**

Se seleccionaron los componentes electrónicos necesarios para la construcción del prototipo, incluyendo Arduino Uno, sensor HW-080, pantalla LCD 16x2, protoboard, cables de conexión, resistencias, potenciómetro, batería de alimentación y carcasa protectora. La selección se realizó considerando criterios de bajo costo, facilidad de integración y disponibilidad comercial.

- **Verificación individual de componentes**

Antes del ensamblaje se verificó el funcionamiento individual de cada componente electrónico. Se comprobó la alimentación de la placa Arduino, la respuesta del sensor HW-080 y el correcto funcionamiento de la pantalla LCD, descartando posibles fallas de fábrica.

- **Montaje preliminar sobre protoboard**

Se realizó el ensamblaje inicial sobre una protoboard para facilitar modificaciones y pruebas. El sensor HW-080 fue conectado a los terminales de alimentación y al puerto analógico del Arduino. Posteriormente se conectó la pantalla LCD a los pines digitales correspondientes.

- **Interconexión del sensor HW-080**

La conexión eléctrica del sensor se realizó utilizando el terminal VCC hacia la salida de 5 voltios del Arduino, el terminal GND hacia tierra y la salida analógica AO hacia



la entrada analógica A0 del microcontrolador. Esta configuración permitió la transmisión continua de señales relacionadas con la humedad del suelo.

- **Instalación de la pantalla LCD**

La pantalla LCD fue conectada al microcontrolador mediante una configuración paralela. Se incorporó un potenciómetro para regular el contraste de visualización y se verificó la correcta presentación de caracteres en pantalla.

- **Desarrollo del cableado definitivo**

Después de verificar el funcionamiento preliminar se organizó el cableado interno del sistema. Los conductores fueron fijados y distribuidos para evitar interferencias eléctricas y posibles desconexiones durante el transporte o uso.

- **Programación del microcontrolador**

Utilizando el entorno Arduino IDE se desarrolló el programa encargado de capturar las señales provenientes del sensor, procesarlas y mostrarlas en la pantalla LCD. Durante esta etapa se realizaron múltiples pruebas de lectura y estabilidad del sistema.

- **Pruebas de funcionamiento**

Concluido el ensamblaje electrónico se ejecutaron pruebas operativas para verificar el encendido del sistema, la estabilidad de las lecturas y la comunicación entre todos los componentes electrónicos. Se realizaron lecturas en muestras con distintos niveles de humedad.

- **Integración en carcasa protectora**

Una vez validado el funcionamiento del sistema, todos los componentes fueron instalados dentro de una caja protectora portátil. La carcasa permitió proteger los elementos electrónicos frente a golpes, polvo y condiciones ambientales propias del trabajo de campo.

- **Verificación final del prototipo**

Finalmente se realizó una inspección integral del equipo verificando conexiones, alimentación, estabilidad de lectura y visualización de resultados. El prototipo quedó

listo para su etapa de calibración y posterior aplicación en los ensayos de humedad del suelo desarrollados durante la investigación.

- **Muestreo y rotulado**

Se recolectaron muestras de suelo en los puntos establecidos, asegurando su identificación mediante rotulado único y registrando las condiciones de campo necesarias para la trazabilidad (p. ej., profundidad, estado de humedad aparente y observaciones).

- **Preparación y acondicionamiento de muestras**

Las muestras se acondicionaron para el ensayo (homogeneización y control de interferencias como piedras/raíces), manteniendo criterios uniformes para todas las mediciones a fin de garantizar comparabilidad entre métodos.

- **Determinación de humedad**

En laboratorio, y bajo supervisión y normas de seguridad institucional, se aplicó el método Speedy como procedimiento de referencia, siguiendo estrictamente el manual del equipo y los protocolos de seguridad (sin modificar reactivos, cantidades o condiciones establecidas por el fabricante/institución).

- **Registro y control de calidad de datos**

Para cada muestra se registraron lecturas de ambos métodos, incluyendo repeticiones, y se aplicaron controles básicos (detección de valores atípicos, consistencia entre repeticiones, verificación de equipos).

- **Procesamiento y análisis comparativo**

Se consolidó la base de datos y se evaluó la correlación entre métodos mediante estadísticos de comparación (diferencia promedio, error absoluto, dispersión repetibilidad y correlación), sustentando el desempeño del sensor frente al método de referencia.



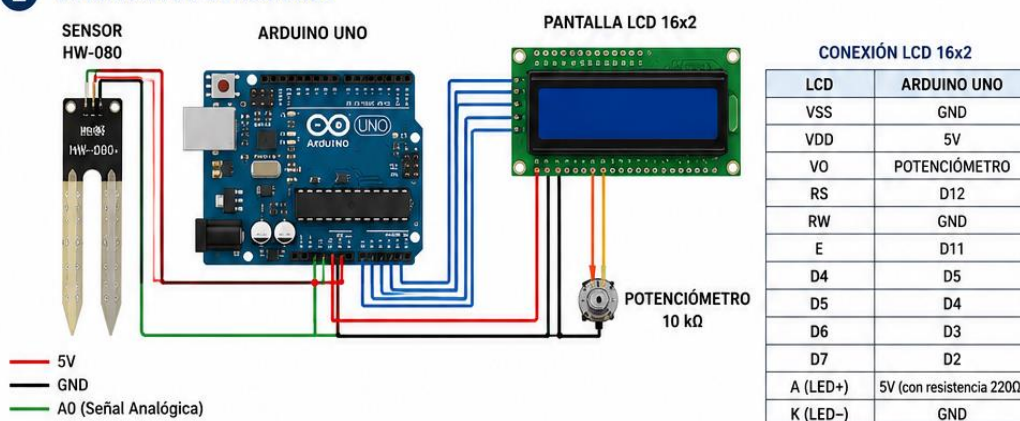
DIAGRAMA DEL SISTEMA ARDUINO CON SENSOR HW-080 PARA MEDIR LA HUMEDAD DEL SUELO

1 DIAGRAMA DE BLOQUES DEL SISTEMA

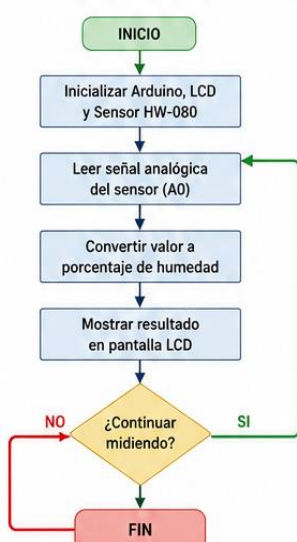
El sistema está compuesto por tres módulos principales: adquisición, procesamiento y visualización.



2 DIAGRAMA DE CONEXIONES



3 FLUJOGRAMA DE FUNCIONAMIENTO



DISPOSITIVO ENSAMBLADO



DESCRIPCIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

- El sensor HW-080 detecta la humedad del suelo y genera una señal analógica proporcional.
- El Arduino UNO procesa la señal y la convierte en porcentaje de humedad.
- El resultado se muestra en la pantalla LCD 16x2 en tiempo real.
- El sistema es portátil, de bajo costo y adecuado para mediciones in situ.

FUENTE: Arduino, 2025

Figura 14 — Diagrama del sistema Arduino

4.6 Técnicas e instrumentos

- **Técnica**

La técnica empleada fue la medición directa y registro sistemático del contenido de humedad del suelo mediante ensayos comparativos, aplicando dos procedimientos sobre las mismas muestras y/o puntos de muestreo: medición in situ con sensor electrónico y determinación por método de referencia en condiciones controladas. La obtención de datos se realizó mediante observación instrumental, con lecturas repetidas para evaluar la consistencia y el desempeño de cada método.

- **Instrumentos**

Se utilizaron dos instrumentos principales: (i) un sistema de medición basado en microcontrolador Arduino acoplado al sensor HW-080 para la adquisición de lecturas de humedad del suelo en campo; y (ii) el equipo Speedy (método del carburo de calcio) para la determinación de humedad como referencia. Como instrumentos complementarios se emplearon recipientes y herramientas de muestreo (pala, pico y bolsas de muestreo), balanza para control de masa de muestra, cronómetro para estandarizar el tiempo de estabilización lectura, y fichas de registro para garantizar la trazabilidad y el ordenamiento de los datos.

4.7 Análisis estadístico

El análisis estadístico se realizó con enfoque cuantitativo y comparativo, orientado a determinar el grado de correspondencia entre las mediciones de humedad del suelo obtenidas con el sistema Arduino + sensor HW-080 y el método al horno y método Speedy como referencia. En primer lugar, se elaboró una base de datos consolidada por muestra y repetición, y se aplicó estadística descriptiva para cada método (promedio, desviación estándar, varianza, mínimo-máximo y coeficiente de variación), con el fin de caracterizar la dispersión y la repetibilidad de las lecturas.

Posteriormente, se evaluó la relación entre métodos mediante análisis de asociación y correlación. Para ello, se estimó el coeficiente de correlación (Pearson si se cumplió normalidad; Spearman en caso contrario) y se ajustó un modelo de regresión lineal para cuantificar la capacidad del sensor de reproducir los valores del método Speedy y, de ser necesario, generar una ecuación de calibración. Asimismo, se calcularon indicadores de

desempeño del sistema propuesto, error absoluto medio (MAE), y porcentaje de error, evaluando la exactitud frente al método de referencia.

Finalmente, se verificaron supuestos estadísticos (normalidad mediante Shapiro–Wilk y homogeneidad de varianzas mediante Levene) y, cuando correspondió, se aplicaron Prueba t para muestras relacionadas de comparación de medias (t de Student para muestras relacionadas), considerando un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$. Los resultados se presentaron mediante tablas y gráficos (dispersión, ajuste lineal y/o gráficos de correlación) para sustentar técnicamente la comparación entre los tres métodos.



CAPÍTULO V

RESULTADOS Y DISCUSIONES

5.1 Análisis de resultados

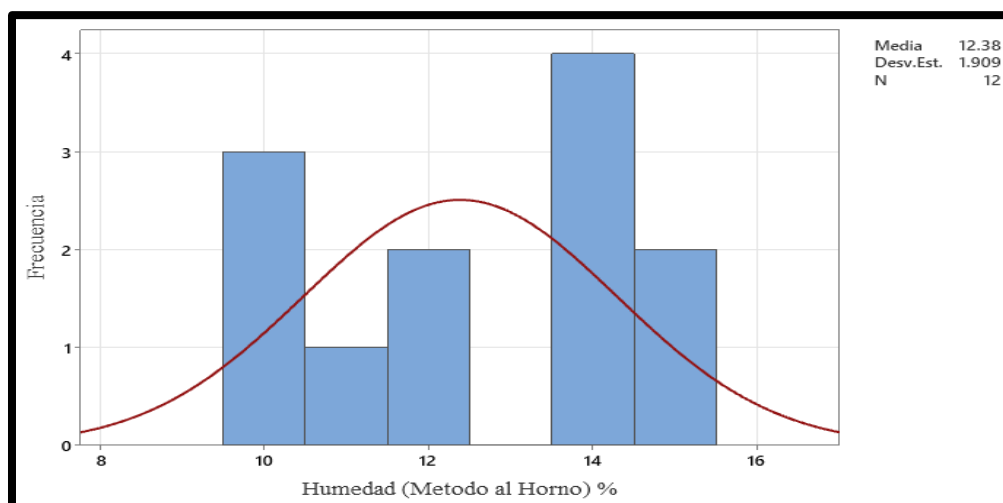
5.1.1 Análisis descriptivo de las mediciones de humedad del suelo

En esta sección se presenta el análisis descriptivo de las mediciones de humedad del suelo obtenidas mediante el método al horno, el método Speedy y el sistema Arduino con sensor HW-080, con el propósito de caracterizar el comportamiento inicial de los datos y establecer una base estadística para las comparaciones posteriores entre métodos. Para ello, se emplearon medidas de tendencia central y de dispersión, tales como la media, mediana, desviación estándar, varianza, error estándar, valores mínimos y máximos, así como el coeficiente de variación, a fin de identificar la magnitud, estabilidad y variabilidad de las mediciones registradas. Este análisis permite reconocer diferencias preliminares en el comportamiento de cada método, así como evaluar la consistencia de los datos antes de proceder con pruebas de normalidad, análisis de correlación, comparación estadística entre métodos y evaluación del desempeño del sistema Arduino con sensor HW-080 en la determinación del contenido de humedad del suelo.

Tabla 8 — Estadísticos descriptivos globales del contenido de humedad

Variable	N	Media	Error estándar de la media	Desv.Est.	Mínimo	Q1	Mediana	Máximo
Humedad (Método al horno) %	12	12.3833	0.551066	1.90895	9.76	10.223	12.705	14.6
Humedad Método Speedy (ASTM D4944)	12	12.925	0.512736	1.77617	10.5	11	13	15.2
Humedad Sensor HW-080 (Arduino)	12	11.25	0.719059	2.49089	8	8.5	11.5	14
NOTA El método al horno presentó una humedad media de 12.38 %, Speedy 12.93 % y el sensor HW-080 11.25 %. El sensor mostró la mayor variabilidad (D.Est. = 2.49 %)								

- a) **Humedad por método al horno (%).** La humedad determinada por el método al horno presentó una media de 12.3833 %, con una desviación estándar de 1.90895 y un rango entre 9.76 % y 14.60 %, lo que evidencia una variabilidad moderada en el contenido de humedad de las muestras analizadas. La cercanía entre la media y la mediana (12.705 %) sugiere una distribución relativamente equilibrada, por lo que este método de referencia refleja de manera consistente el comportamiento hídrico del suelo evaluado.
- b) **Humedad por método Speedy (ASTM D4944) (%).** La humedad medida mediante el método Speedy registró una media de 12.925 %, ligeramente superior a la obtenida por el método al horno, con una desviación estándar de 1.77617. Este comportamiento muestra una dispersión moderada y una tendencia a estimar valores de humedad algo más altos, manteniendo además una distribución estable, como lo evidencia la proximidad entre la media y la mediana (13.00 %), lo que resalta su utilidad como método rápido de determinación de humedad.
- c) **Humedad por sensor HW-080 (Arduino) (%).** La humedad evaluada con el sensor HW-080 mostró una media de 11.25 % y la mayor desviación estándar de los métodos comparados (2.49089), con valores entre 8 % y 14 %, lo que revela una mayor dispersión y menor estabilidad en las mediciones. Este resultado sugiere que, aunque el sensor permite una estimación práctica del contenido de humedad, su comportamiento es más variable frente a los métodos convencionales.

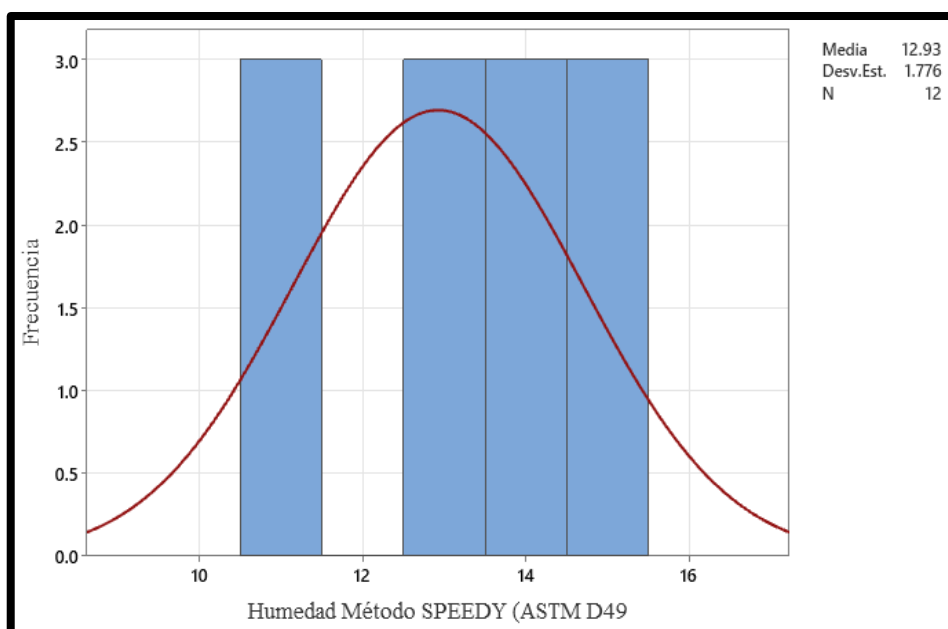


NOTA

El gráfico muestra que la humedad determinada por el método al horno que los 12 datos se concentran principalmente alrededor de la media (12.38 %), con una dispersión moderada (desviación estándar = 1.909), observándose valores entre aproximadamente 9.8 % y 14.6 %. La forma general de la distribución presenta una tendencia cercana a la normal, aunque con ligera irregularidad debido al tamaño reducido de la muestra, por lo que puede interpretarse que el contenido de humedad del suelo tiene un comportamiento relativamente homogéneo, sin evidenciar valores extremos marcadamente atípicos.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 15 — Histograma de la humedad por el método al horno

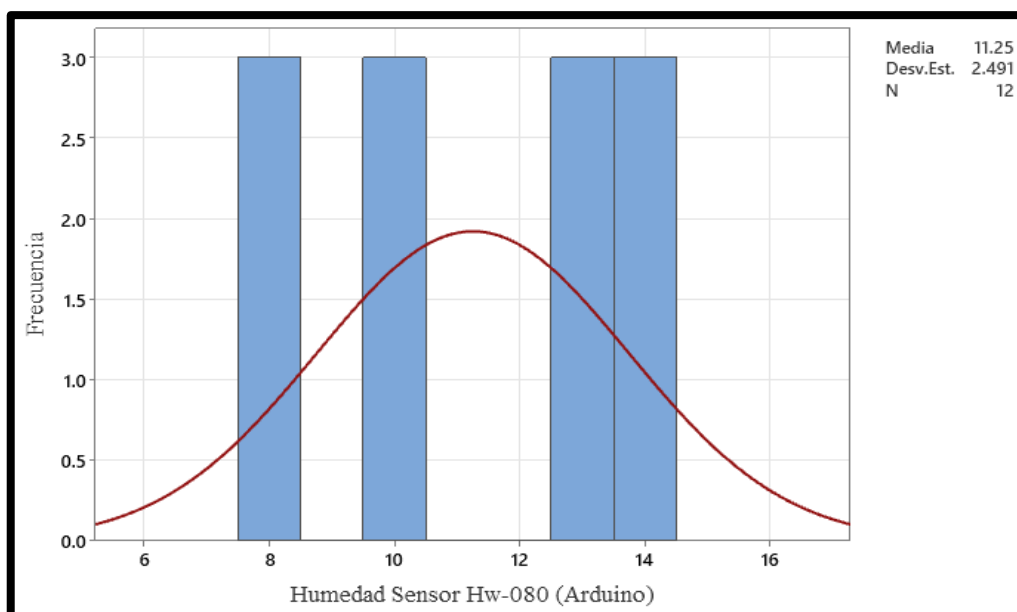


NOTA

El gráfico muestra que la humedad medida por el método Speedy (ASTM D4944) muestra que los 12 valores se agrupan principalmente alrededor de la media (12.93 %), con una dispersión moderada (desviación estándar = 1.776), lo que indica una variabilidad relativamente controlada entre mediciones. La forma de la distribución sigue una tendencia aproximadamente normal, con mayor concentración de datos entre 12 % y 15 %, sin presencia evidente de valores atípicos extremos; en conjunto, esto sugiere que el método Speedy presenta un comportamiento estadísticamente estable y consistente para estimar el contenido de humedad del suelo.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 16 — Histograma de la humedad método Speedy



NOTA

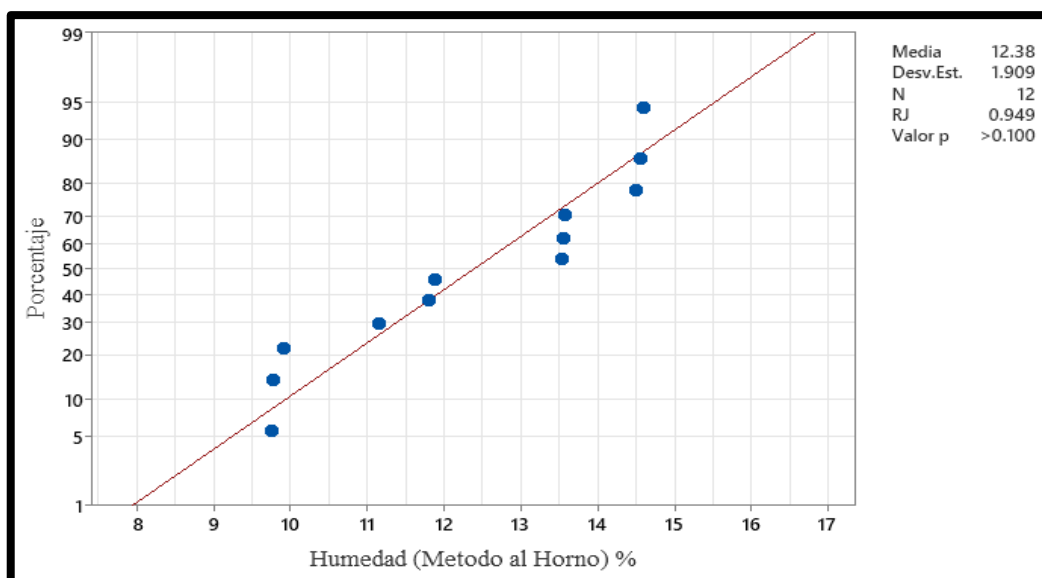
El gráfico muestra que la humedad medida con el sensor HW-080 (Arduino) muestra que los 12 datos se distribuyen alrededor de una media de 11.25 %, con una desviación estándar de 2.491, la más alta entre los métodos evaluados, lo que evidencia una mayor dispersión y menor uniformidad en las mediciones. Aunque la distribución presenta una forma aproximadamente compatible con la curva normal, se observa una concentración de valores en intervalos separados, principalmente entre 8 % y 14 %, lo que sugiere mayor variabilidad interna; en términos estadísticos, esto indica que el sensor ofrece mediciones menos consistentes y más fluctuantes en comparación con los métodos convencionales.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 17 — Histograma de la humedad método sensor HW – 080 (Arduino)

5.1.2 Análisis de normalidad de datos obtenidos

Para iniciar el análisis estadístico, se evaluó la normalidad de las variables estudiadas, con el propósito de verificar si los datos presentan una distribución aproximadamente normal. Esta comprobación es importante porque permite seleccionar adecuadamente las pruebas estadísticas posteriores, ya sean paramétricas o no paramétricas, garantizando así una interpretación más confiable de los resultados obtenidos.

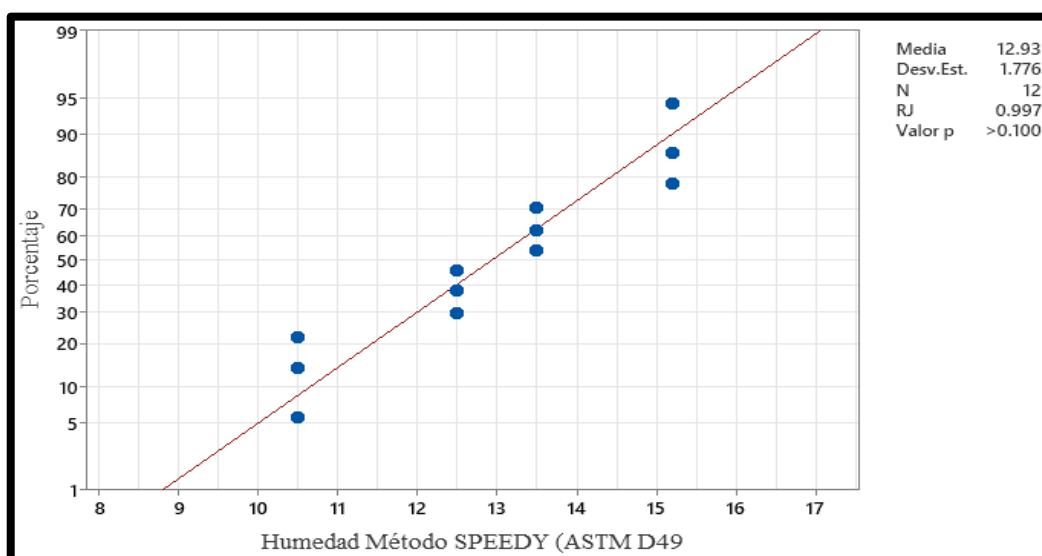


NOTA

La gráfica muestra la probabilidad normal para la humedad determinada por el método al horno muestra que los puntos se alinean razonablemente cerca de la recta de referencia, lo que indica que los datos presentan un comportamiento aproximadamente normal. Además, el valor $p > 0.100$ sugiere que no existe evidencia estadística suficiente para rechazar la hipótesis de normalidad, mientras que el coeficiente $RJ = 0.949$ respalda un buen ajuste de los datos a la distribución normal. En términos prácticos, esto permite considerar que la variable cumple adecuadamente el supuesto de normalidad para análisis estadísticos paramétricos.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 18 — Gráfica de normalidad de la humedad por el método al horno

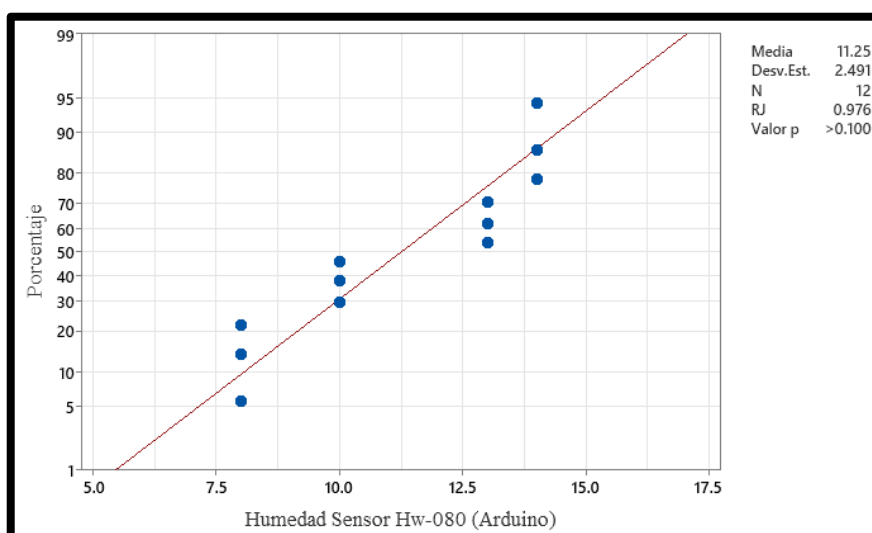


NOTA

La gráfica muestra la probabilidad normal de la humedad medida por el método Speedy (ASTM D4944) evidencia que los datos se distribuyen muy próximos a la línea de referencia, lo que indica un buen ajuste a la distribución normal. Este comportamiento se confirma con el valor $p > 0.100$, que muestra que no hay evidencia estadística para rechazar la normalidad, y con el coeficiente $RJ = 0.997$, que refleja un ajuste muy alto. En términos técnicos, se puede concluir que esta variable cumple satisfactoriamente el supuesto de normalidad, por lo que es apta para aplicar pruebas estadísticas paramétricas.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 19 — Gráfica de normalidad para la humedad por el método Speedy



NOTA

La gráfica muestra la probabilidad normal de la humedad medida con el sensor HW-080 (Arduino) muestra que los puntos se ubican relativamente próximos a la línea de referencia, lo que indica un comportamiento aproximadamente normal de los datos. Este ajuste se respalda con el valor $p > 0.100$, que señala ausencia de evidencia estadística para rechazar la normalidad, y con el coeficiente $RJ = 0.976$, que evidencia una buena correlación con la distribución normal, por lo que esta variable puede considerarse compatible con el supuesto de normalidad para análisis estadísticos paramétricos, aunque su dispersión sigue siendo mayor que la observada en los otros métodos de humedad.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 20 — Gráfica de normalidad de la humedad por el método de sensor HW-080

5.1.3 Correlación entre las mediciones del sistema Arduino HW-080 y los métodos de referencia

En este capítulo se responde al objetivo determinar la correlación de las mediciones entre los valores de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y los valores determinados por los métodos al horno y Speedy.

Tabla 9 — Correlaciones entre los métodos de referencia

	Humedad (Método al Horno) %	Humedad Método Speedy (ASTM D4944)
Humedad Método Speedy (ASTM D4944)	0.978	
Humedad Sensor HW-080 (Arduino)	0.993	0.966
NOTA Los resultados muestran una correlación adecuada entre los métodos evaluados, destacando la relación entre el sensor HW-080 y el método al horno ($r = 0.993$). La correlación entre Speedy y el método al horno fue $r = 0.978$, mientras que entre el HW-080 y Speedy fue $r = 0.966$. FUENTE: Elaboración propia		

Tabla 10 — Correlaciones en parejas de Pearson para los métodos de referencia

Muestra 1	Muestra 2	N	Correlación	IC de 95% para ρ	Valor p
Humedad Método Speedy (ASTM D4944)	Humedad (Método al horno) %	12	0.978	(0.920; 0.994)	0.000
Humedad Sensor HW-080 (Arduino)	Humedad (Método al horno) %	12	0.993	(0.974; 0.998)	0.000
Humedad Sensor HW-080 (Arduino)	Humedad Método Speedy (ASTM D4944)	12	0.966	(0.881; 0.991)	0.000

NOTA

Los resultados muestran una correlación adecuada entre los métodos evaluados, con valores de $r = 0.978$ (Speedy–horno), $r = 0.993$ (HW-080–horno) y $r = 0.966$ (HW-080–Speedy). Todas las correlaciones fueron estadísticamente significativas ($p < 0.001$; $n = 12$), con intervalos de confianza del 95 %.

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 11 — Resumen del modelo de regresión para el sensor HW-080

S	R-cuadrado	R-cuadrado (ajustado)	R-cuadrado (pred)	S de la prueba	R-cuadrado de la prueba
0.162442	99.78%	99.69%	98.89%	0.484861	89.55%

NOTA

Los resultados muestran que existe un ajuste considerable ($R^2 = 99.78$ %; R^2 ajustado = 99.69 %). Asimismo, obtuvo un R^2 predictivo de 98.89 % y un R^2 de prueba de 89.55 %, con un error estándar de 0.162442.

FUENTE: Elaboración propia

De la tabla 09, 10 y 11 y en atención al objetivo sobre determinar el grado de correlación entre las mediciones de humedad del suelo obtenidas mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y las obtenidas con los métodos al horno y Speedy, los resultados estadísticos evidencian una correlación lineal adecuada y estadísticamente significativa entre los métodos evaluados. La correlación de Pearson entre el método Speedy y el método al horno fue de $r = 0.978$, con IC de 95 %: 0.920 a 0.994 y $p = 0.000$, lo que indica una asociación positiva muy fuerte entre ambos procedimientos. Del mismo modo, la correlación entre el sensor HW-080 y el método al horno alcanzó $r = 0.993$, con IC de 95 %: 0.974 a 0.998 y $p = 0.000$, constituyéndose como la relación más alta del análisis, lo que demuestra que el sistema Arduino reproduce con elevada consistencia la tendencia de variación del contenido de humedad respecto al método de referencia. Asimismo, la correlación entre el sensor HW-080 y el método Speedy fue de $r = 0.966$, con IC de 95 %: 0.881 a 0.991 y $p = 0.000$, confirmando también una asociación positiva muy fuerte. Complementariamente, el resumen del modelo muestra un $R^2 = 99.78$ %, un R^2 ajustado = 99.69 % y un R^2 predicho = 98.89 %, lo que indica que el modelo explica prácticamente toda la variabilidad observada en las mediciones, con

una capacidad predictiva muy alta y un ajuste estadístico robusto. El valor de $S = 0.162442$ y el S de la prueba $= 0.484861$ reflejan un error residual bajo, reforzando la calidad del ajuste. En conjunto, estos resultados permiten concluir que existe un grado de correlación adecuado entre el sistema Arduino con sensor HW-080 y los métodos convencionales, especialmente con el método al horno, por lo que el sensor presenta un desempeño estadísticamente consistente y técnicamente prometedor para la determinación in situ del contenido de humedad del suelo.

El sistema Arduino con sensor HW-080 mostró una correlación adecuada con los métodos de referencia, especialmente con el método al horno ($r = 0.993$; IC 95 %: 0.974–0.998; $p = 0.000$), y también con el método Speedy ($r = 0.966$; IC 95 %: 0.881–0.991; $p = 0.000$), lo que evidencia una asociación estadísticamente muy fuerte. Asimismo, el modelo presentó un $R^2 = 99.78\%$, indicando que el sistema Arduino con sensor HW-080 determina de manera muy consistente la variación del contenido de humedad del suelo, consolidándose como un prototipo preliminar con potencial de estimación en las condiciones evaluadas para su medición in situ

5.1.4 Comparación estadística de las mediciones de humedad entre métodos

La comparación estadística de las mediciones de humedad entre métodos permite determinar si existen diferencias significativas entre los valores obtenidos con el sistema Arduino y los métodos de referencia en las mismas muestras. Si los datos presentan distribución normal corresponde aplicar la prueba t para muestras relacionadas, la cual evalúa si la diferencia promedio entre métodos es significativa o no.

5.1.4.1 Prueba t para muestras relacionadas e IC entre el método Sensor HW-080 Arduino y método al horno

Tabla 12 — Estadísticas descriptivas de Arduino y horno

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Humedad Sensor HW-080 (Arduino)	12	11.250	2.491	0.719
Humedad (método al horno) %	12	12.383	1.909	0.551

NOTA

Los resultados muestran que, en las 12 muestras evaluadas, el sensor HW-080 obtuvo una humedad media de 11.250 %, frente al 12.383 % del método al horno. El sensor presentó una mayor dispersión de los resultados, con desviaciones estándar de 2.491 % y 1.909 %.

FUENTE: Elaboración propia

Tabla 13 — Estimación de la diferencia pareada

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia_μ
-1.133	0.636	0.184	(-1.538; -0.729)

NOTA

En esta tabla de la diferencia pareada la media fue de -1.133 %, con una desviación estándar de 0.636. El IC de 95 % para la diferencia se ubicó entre -1.538 % y -0.729 %, indicando que el sensor HW-080 registró valores de humedad inferiores a los obtenidos mediante el método al horno.

FUENTE: Elaboración propia

Diferencia_μ: media de población de (Humedad Sensor HW-080 (Arduino) - Humedad (Método al horno) %)

Tabla 14 — Prueba t para muestras relacionadas

Valor T	GL	Valor p
-6.17	11	0.000

NOTA

En esta tabla, se obtuvo un valor de $t = -6.17$, con 11 grados de libertad y $p < 0.001$, evidenciando una diferencia estadísticamente significativa entre las mediciones del sensor HW-080 y el método al horno.

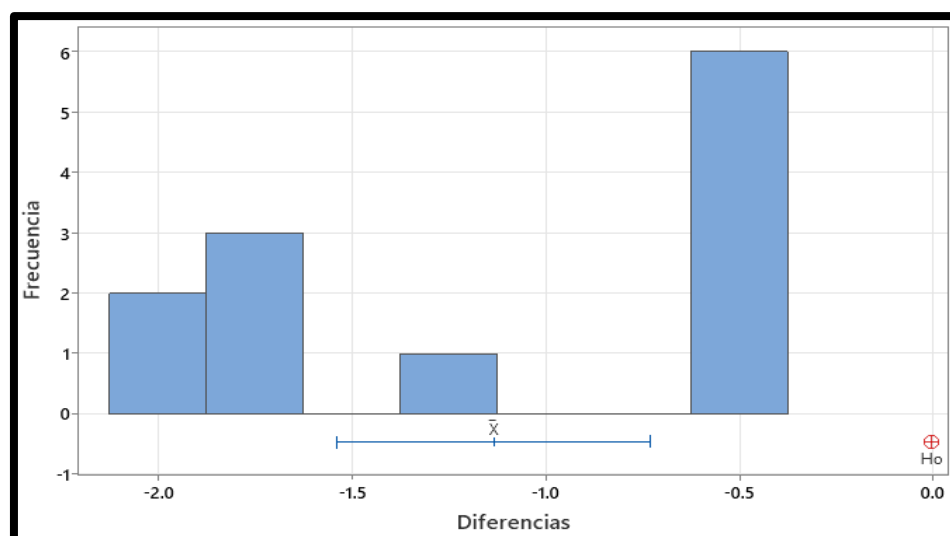
FUENTE: Elaboración propia

Hipótesis nula H_0 : diferencia_μ = 0

Hipótesis alterna H_1 : diferencia_μ ≠ 0

Del resultado del análisis de la Prueba t para muestras relacionadas T, referido a la comparación estadística de las mediciones de humedad entre métodos, los resultados de la prueba t indican que el análisis estadístico

permitió establecer que las mediciones de humedad obtenidas mediante el sensor HW-080 (Arduino) difieren significativamente de las obtenidas por el método al horno (ASTM D2216) ($t = -6.17$; $p < 0.001$). La diferencia promedio fue de -1.133% , lo que indica que el sensor Arduino tiende a subestimar el contenido de humedad respecto al método de referencia. Por tanto, se concluye que existe una diferencia estadísticamente significativa entre ambos métodos de medición, cumpliéndose el objetivo de comparar estadísticamente las mediciones de humedad entre ambos procedimientos.



FUENTE: Elaboración propia

El gráfico muestra las diferencias entre las mediciones de humedad del sensor HW-080 (Arduino) y el método al horno (ASTM D2216) muestra que la totalidad de las diferencias se concentra en valores negativos, indicando una tendencia sistemática del sensor a subestimar el contenido de humedad respecto al método de referencia. Asimismo, el intervalo de confianza del 95 % para la media de las diferencias se encuentra completamente por debajo del valor nulo (0), el cual corresponde a la hipótesis nula ($H_0: \mu_d = 0$), evidenciando que la diferencia promedio es estadísticamente distinta de cero. La ausencia de solapamiento entre el intervalo de confianza y H_0 confirma, con un nivel de significancia del 5 %, la existencia de un sesgo negativo significativo en las mediciones del sensor HW-080, resultado consistente con la prueba t para muestras relacionadas ($p < 0.001$).

Figura 21 — Gráfica de histograma de diferencias entre el sensor HW-080 y al horno

5.1.4.2 Prueba t para muestras relacionadas e IC entre método Sensor HW-080 Arduino y Método Speedy (ASTM D4944)

Tabla 15 — Estadísticas descriptivas de Arduino y Speedy

Muestra	N	Media	Desv.Est.	Error estándar de la media
Humedad Sensor HW-080 (Arduino)	12	11.250	2.491	0.719
Humedad Método Speedy (ASTM D4944)	12	12.925	1.776	0.513
NOTA Los resultados en las 12 muestras, el sensor HW-080 presentó una humedad media de 11.250 %, inferior al 12.925 % obtenido mediante el método Speedy. Asimismo, mostró una mayor dispersión de los resultados, con desviaciones estándar de 2.491 % y 1.776 %. FUENTE: Elaboración propia				

Tabla 16 — Estimación de la diferencia pareada

Media	Desv. Est.	Error estándar de la media	IC de 95% para la diferencia μ
-1.675	0.900	0.260	(-2.247; -1.103)
NOTA En esta tabla, la diferencia media fue de -1.675 %, con una desviación estándar de 0.900. El IC de 95 % se ubicó entre -2.247 % y -1.103 %, indicando que el sensor HW-080 registró valores de humedad inferiores a los obtenidos mediante el método Speedy. FUENTE: Elaboración propia			

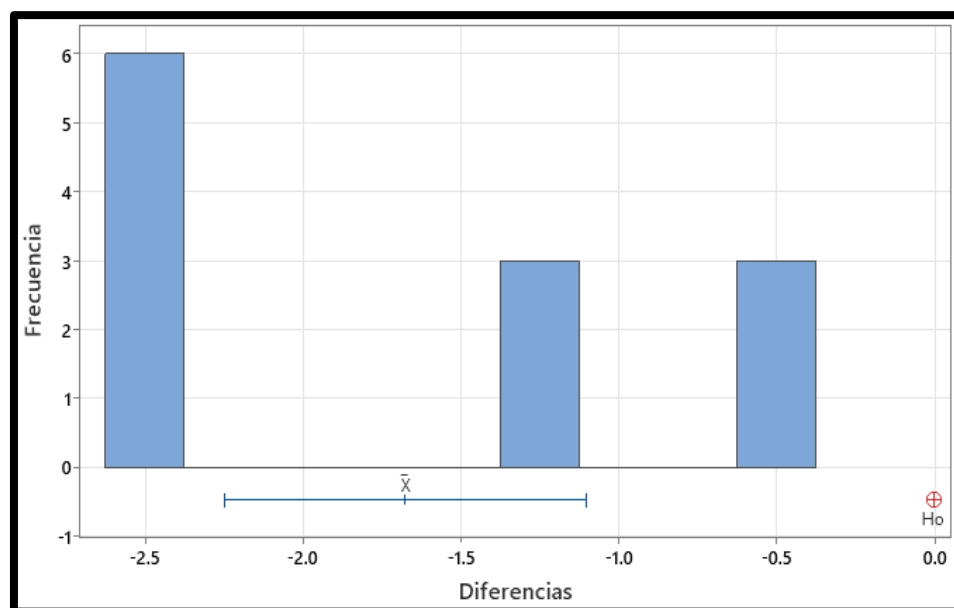
- **Diferencia μ :** Media de población de (Humedad Sensor HW-080 (Arduino) - Humedad Método Speedy (ASTM D4944))

Tabla 17 — Prueba t para muestras de Arduino y Speedy

Valor T	GL	Valor p
-6.45	11	0.000
NOTA El resultado muestra que la prueba t para muestras pareadas mostró una diferencia estadísticamente significativa entre el sensor HW-080 y el método Speedy ($t = -6.45$; $gl = 11$; $p < 0.001$), evidenciando diferencias sistemáticas entre ambas mediciones. FUENTE: Elaboración propia		

- **Hipótesis nula H_0 :** Diferencia $_{\mu} = 0$
- **Hipótesis alterna H_1 :** Diferencia $_{\mu} \neq 0$

La comparación de las mediciones de humedad entre el sensor HW-080 (Arduino) y el método Speedy (ASTM D4944) mediante la prueba t de Student para muestras relacionadas evidenció diferencias estadísticamente significativas entre ambos métodos. Las estadísticas descriptivas muestran que el sensor HW-080 registró una humedad promedio de 11.250 %, mientras que el método Speedy presentó una media de 12.925 %, con una diferencia pareada promedio de -1.675 %, lo que indica una subestimación sistemática del sensor respecto al método de referencia. Asimismo, el intervalo de confianza del 95 % para la diferencia media (-2.247 % a -1.103 %) no incluye el valor nulo, confirmando que la diferencia observada es estadísticamente significativa. Esta evidencia es respaldada por el resultado de la prueba t ($t = -6.45$; $p < 0.001$), por lo que se rechaza la hipótesis nula y se concluye que existen diferencias significativas entre las mediciones de humedad obtenidas mediante el sensor HW-080 (Arduino) y el método Speedy (ASTM D4944), siendo el sensor el que tiende a registrar valores inferiores de humedad respecto al método Speedy.



FUENTE: Elaboración propia

El gráfico muestra que las diferencias entre las mediciones del sensor HW-080 (Arduino) y el método Speedy (ASTM D4944) son predominantemente negativas, evidenciando que el sensor tiende a subestimar el contenido de humedad. Además, el intervalo de confianza del 95 % no incluye el valor nulo (0), confirmando una diferencia estadísticamente significativa entre ambos métodos, en concordancia con la prueba t para muestras relacionadas ($p < 0.001$).

Figura 22 — Gráfica de histograma de diferencias entre el sensor HW-080 y Speedy

5.1.5 Precisión y reproducibilidad del sistema Arduino con sensor HW-080

La precisión y reproducibilidad del sistema Arduino con sensor HW-080 deben evaluarse a partir de sus propios estadísticos de dispersión y de la estabilidad de sus repeticiones, comparando dichos resultados con los obtenidos mediante los métodos al horno y Speedy. En este sentido, el análisis principal debe centrarse en el comportamiento del sensor HW-080, mientras que los métodos convencionales cumplen la función de referencia para contextualizar su nivel de variabilidad y consistencia.

Tabla 18 — Precisión y variabilidad de las mediciones de humedad

Método	N	Media	Error estándar de la media	Desv. Est.	Varianza	CV (%)
Humedad (método al horno) %	12	12.3833	0.551066	1.90895	3.644	15.4155
Humedad método Speedy	12	12.925	0.512736	1.77617	3.155	13.7421
Humedad Sensor HW-080 (Arduino)	12	11.25	0.719059	2.49089	6.205	22.1412
NOTA El resultado presenta una media de 12.3833 %, el método Speedy 12.925 % y el sensor HW-080 11.250 %. El sensor mostró la mayor variabilidad, con un CV de 22.14 %, frente a 15.42 % del método al horno y 13.74 % del método Speedy. FUENTE: Elaboración propia						

En cuanto al objetivo referido a la precisión y reproducibilidad del sistema Arduino con sensor HW-080, los resultados muestran que este método presentó una desviación estándar de 2.49089 y un coeficiente de variación de 22.1412 %, valores superiores a los obtenidos por el método al horno (DE = 1.90895; CV = 15.4155 %) y por el método Speedy (DE = 1.77617; CV = 13.7421 %). Considerando que, desde el punto de vista estadístico, una menor desviación estándar y un menor coeficiente de variación reflejan una menor dispersión de los datos y, por tanto, una mayor precisión, se infiere que el sistema Arduino con sensor HW-080 presenta una precisión inferior respecto a los métodos convencionales evaluados. Asimismo, dado que una menor variabilidad entre repeticiones es indicativa de una mayor reproducibilidad, los resultados sugieren que el sensor HW-080 muestra una estabilidad global menor en sus mediciones. En consecuencia, aunque el sistema Arduino con sensor HW-080 constituye un prototipo preliminar con potencial estimación para la determinación del contenido de humedad del suelo in situ, su comportamiento estadístico evidencia una mayor fluctuación en comparación con el método al horno y, especialmente, con el método Speedy, el cual presentó la menor variabilidad relativa y, por ende, el mejor desempeño en términos de precisión y reproducibilidad.

5.1.6 Sesgo y capacidad de estimación del sistema Arduino con sensor HW-080

Para analizar el sesgo y la capacidad de estimación del sistema Arduino con sensor HW-080, se evaluaron las diferencias entre las mediciones obtenidas con dicho sistema y las registradas por los métodos de referencia, al horno y Speedy. El sesgo se determinó mediante la diferencia simple promedio entre el valor medido por el sensor y el valor obtenido por cada método convencional, lo que permitió identificar si el sistema Arduino tendía a subestimar o sobrestimar el contenido de humedad del suelo. Por otro lado, la capacidad de estimación del sensor se analizó mediante correlación y regresión lineal simple, considerando como referencia los valores de humedad determinados por los métodos al horno y Speedy. Para ello, se evaluó la intensidad de la asociación, la significancia estadística y el coeficiente de determinación, con el fin de establecer en qué medida las mediciones del sistema Arduino explican y reproducen la variabilidad observada en los métodos convencionales.

Tabla 19 — Sesgo del Arduino HW-080 respecto a los métodos de referencia

Comparación	Sesgo promedio (Arduino – referencia)	Desv. Est. de la diferencia	Mínimo	Máximo	Error absoluto medio	Sesgo porcentual medio (%)
Arduino vs método al horno	-1.133	0.636	-1.910	-0.490	1.133	-10.05
Arduino vs método Speedy	-1.675	0.900	-2.500	-0.500	1.675	-13.85
NOTA El resultado muestra que el sensor HW-080 presentó un sesgo promedio de -1.133 % respecto al método al horno y de -1.675 % respecto al método Speedy. El sesgo porcentual medio fue de -10.05 % y -13.85 %, lo que evidencia que el sensor tiende a registrar valores inferiores a ambos métodos. FUENTE: Elaboración propia						

Los resultados evidencian que el sistema Arduino con sensor HW-080 presenta sesgo negativo respecto a ambos métodos de referencia, ya que las diferencias promedio fueron de -1.133 % frente al método al horno y de -1.675 % frente al método Speedy, lo que indica una tendencia sistemática a subestimar el contenido



de humedad del suelo. Asimismo, el menor sesgo y menor dispersión observados respecto al método al horno sugieren que el comportamiento del sistema Arduino es más cercano al método al horno que al método Speedy.

Tabla 20 — Capacidad de estimación del Arduino con sensor HW-080

Modelo de estimación	Ecuación de regresión	r de Pearson	R ² (%)	R ² ajustado (%)	p del modelo
Método al horno en función del Arduino	Horno = 3.822 + 0.761(Arduino)	0.993	98.61	98.47	0.000
Método Speedy en función del Arduino	Speedy = 5.174 + 0.689(Arduino)	0.966	93.37	92.70	0.000
NOTA El resultado presenta una relación lineal adecuada entre el sensor HW-080 y los métodos de referencia. Para el método al horno se obtuvo $r = 0.993$ y $R^2 = 98.61$ %, mientras que para el método Speedy se obtuvo $r = 0.966$ y $R^2 = 93.37$ %. En ambos modelos, $p < 0.001$, que estadísticamente existe una relación significativa. FUENTE: Elaboración propia					

El sistema Arduino con sensor HW-080 mostró una adecuada capacidad de estimación, especialmente respecto al método al horno, con una correlación de $r = 0.993$ y un $R^2 = 98.61$ %, lo que indica que las mediciones del sensor explican casi toda la variabilidad observada en el método de referencia. De igual forma, frente al método Speedy, el sensor presentó una asociación también alta ($r = 0.966$; $R^2 = 93.37$ %). En conjunto, estos resultados demuestran que, aunque el sistema Arduino tiende a subestimar la humedad, posee una fuerte capacidad para reproducir la tendencia de medición de los métodos convencionales, especialmente del método al horno.

En atención al objetivo referido al sesgo y capacidad de estimación del sistema Arduino con sensor HW-080, los resultados muestran que el sistema presenta un sesgo negativo respecto a los métodos de referencia, con diferencias promedio de -1.133 % frente al método al horno y de -1.675 % respecto al método Speedy, lo que evidencia una tendencia sistemática a subestimar el contenido de humedad del suelo. No obstante, en términos de capacidad de estimación, el sensor mostró una

asociación lineal adecuada, especialmente con el método al horno ($r = 0.993$; $R^2 = 98.61 \%$; $p = 0.000$), y también con el método Speedy ($r = 0.966$; $R^2 = 93.37 \%$; $p = 0.000$). Estos resultados indican que, aunque el sistema Arduino registra valores ligeramente inferiores, reproduce de manera consistente la variación de la humedad del suelo, presentando una capacidad predictiva más sólida respecto al método al horno, que constituye la referencia técnica principal.

5.2 Contrastación de hipótesis

La contrastación de hipótesis en la presente investigación se desarrolló con base en los resultados obtenidos a partir de los análisis estadísticos aplicados a las mediciones del contenido de humedad del suelo mediante el sistema Arduino con sensor HW-080, el método al horno y el método Speedy (ASTM D4944). Para ello, se consideraron pruebas de correlación, comparación de medias, análisis de dispersión, error porcentual, sesgo y capacidad de estimación, con el propósito de verificar el cumplimiento de la hipótesis general y de las hipótesis específicas formuladas.

5.2.1 Contrastación de la hipótesis general

- **Hipótesis general (H_1)**

El sistema Arduino con sensor HW-080 determina de manera confiable el contenido de humedad del suelo, presentando una alta correlación, adecuada capacidad de estimación y un desempeño comparable con los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025.

Los resultados de la contrastación de hipótesis evidenciaron que el sistema Arduino con sensor HW-080 presenta una correlación adecuada y estadísticamente significativa con los métodos de referencia al horno ($r = 0.993$; $p < 0.001$) y Speedy ($r = 0.966$; $p < 0.001$), así como una elevada capacidad predictiva ($R^2 = 99.78 \%$; $R^2 = 98.61 \%$ respecto al método al horno y $R^2 = 93.37 \%$ respecto al método Speedy). No obstante, la prueba t para muestras relacionadas identificó diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones del sistema Arduino y los métodos de referencia ($p < 0.001$), asociadas a un sesgo negativo promedio de -1.133% frente al método al horno y -1.675% frente al método Speedy, lo que indica una tendencia del sensor a subestimar el contenido de humedad del suelo.

Por tanto, la hipótesis general se acepta parcialmente, debido a que el sistema Arduino con sensor HW-080 demostró una adecuada confiabilidad desde el punto de vista de la correlación y de la capacidad predictiva; sin embargo, el desempeño no resulta completamente comparable con los métodos normalizados ASTM D2216 y ASTM D4944, al existir diferencias estadísticamente significativas y un sesgo sistemático que requiere corrección mediante calibración específica.

5.2.2 Contrastación de la hipótesis específica 1

- **Hipótesis Específica 1 (H1)**

Existe una correlación positiva, alta y estadísticamente significativa entre los valores de contenido de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y los valores determinados por los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944).

Los coeficientes de correlación de Pearson obtenidos fueron $r = 0.993$ entre el sensor HW-080 y el método al horno, y $r = 0.966$ entre el sensor HW-080 y el método Speedy, con valores de $p = 0.000$ en ambos casos. Los intervalos de confianza al 95 % no incluyeron el valor nulo, confirmando una asociación lineal muy fuerte entre los métodos.

Entonces se acepta la hipótesis específica 1, concluyéndose que el sistema Arduino con sensor HW-080 presenta una correlación favorablemente significativa con los métodos de referencia para la determinación del contenido de humedad del suelo.

5.2.3 Contrastación de la hipótesis específica 2

- **Hipótesis específica 2 (H2)**

No existen diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones del contenido de humedad obtenidas mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y las obtenidas mediante los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944).

La comparación mediante la prueba t para muestras relacionadas evidenció diferencias estadísticamente significativas entre el sistema Arduino y ambos

métodos de referencia. Frente al método al horno se obtuvo $t = -6.17$; $p = 0.000$, mientras que frente al método Speedy se obtuvo $t = -6.45$; $p = 0.000$, observándose además diferencias promedio de -1.133% y -1.675% , respectivamente.

Por tanto, se rechaza la hipótesis específica 2, debido a que existen diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones realizadas por el sistema Arduino con sensor HW-080 y las obtenidas mediante los métodos convencionales de referencia.

5.2.4 Contrastación de la hipótesis específica 3

- **Hipótesis específica 3 (H3)**

El sistema Arduino con sensor HW-080 presenta niveles adecuados de precisión y reproducibilidad en la determinación del contenido de humedad del suelo, comparables a los obtenidos mediante los métodos de referencia.

El análisis de precisión mostró que el sistema Arduino presentó una desviación estándar de 2.49089 y un coeficiente de variación de 22.14 %, superiores a los obtenidos mediante el método al horno ($CV = 15.42 \%$) y el método Speedy ($CV = 13.74 \%$). Estos resultados indican una mayor dispersión de las mediciones y, por consiguiente, una menor precisión y reproducibilidad respecto a los métodos de referencia.

Entonces se rechaza la hipótesis específica 3, debido a que el sistema Arduino con sensor HW-080 presentó una precisión y reproducibilidad inferiores a las observadas en los métodos al horno y Speedy, aunque mantuvo un comportamiento suficientemente consistente para aplicaciones de campo.

5.2.5 Contrastación de la hipótesis específica 4

- **Hipótesis específica 4 (H4)**

El sistema Arduino con sensor HW-080 presenta un sesgo reducido y una adecuada capacidad de estimación respecto a los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944).

Los resultados evidenciaron un sesgo negativo promedio de -1.133 % respecto al método al horno y -1.675 % respecto al método Speedy, indicando una tendencia del sensor a subestimar el contenido de humedad. No obstante, el análisis de regresión mostró una capacidad de estimación muy alta, con $R^2 = 98.61$ % respecto al método al horno y $R^2 = 93.37$ % respecto al método Speedy, además de correlaciones de $r = 0.993$ y $r = 0.966$, respectivamente ($p = 0.000$).

Por tanto, se acepta parcialmente la hipótesis específica 4, puesto que, aunque el sistema Arduino presenta un sesgo sistemático negativo, posee una elevada capacidad para estimar y reproducir el comportamiento de los métodos de referencia, especialmente respecto al método al horno, considerado el patrón técnico de comparación.

5.3 Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación demuestran que el sistema Arduino con sensor HW-080 presenta un desempeño estadísticamente favorable para la determinación in situ del contenido de humedad del suelo, especialmente cuando se compara con el método gravimétrico al horno (ASTM D2216), considerado el patrón de referencia para este tipo de ensayos. El análisis de correlación evidenció una asociación lineal adecuada entre el sistema Arduino y el método al horno ($r = 0.993$; $p < 0.001$), así como una correlación también muy alta con el método Speedy ($r = 0.966$; $p < 0.001$). De manera complementaria, el modelo de regresión presentó un coeficiente de determinación global de 99.78 %, mientras que la capacidad de estimación alcanzó un R^2 de 98.61 % respecto al método al horno y de 93.37 % frente al método Speedy, resultados que indican que el sistema Arduino reproduce con adecuada fidelidad la variabilidad del contenido de humedad del suelo. Estos hallazgos respaldan la aplicación de tecnologías electrónicas de bajo costo para el monitoreo geotécnico y coinciden con lo reportado por Almeida (2025), quien demostró que los sistemas basados en microcontroladores constituyen herramientas confiables, continuas y económicamente viables para el monitoreo ambiental. Asimismo, Alaña y Moreira (2025) señalaron que las plataformas basadas en Arduino representan soluciones adecuadas, escalables y de bajo costo para el monitoreo en tiempo real, especialmente en contextos donde la disponibilidad de infraestructura especializada es limitada.



En relación con la comparación estadística entre métodos, los resultados difieren de lo esperado en un sistema completamente equivalente al método de referencia. La prueba *t* para muestras relacionadas mostró diferencias estadísticamente significativas tanto entre el sistema Arduino y el método al horno ($t = -6.17$; $p < 0.001$) como entre el sistema Arduino y el método Speedy ($t = -6.45$; $p < 0.001$). Las diferencias promedio fueron de -1.133% y -1.675% , respectivamente, lo que evidencia una tendencia sistemática del sensor a registrar valores inferiores de humedad respecto a ambos métodos convencionales. Este resultado indica que, aunque el sensor reproduce adecuadamente la tendencia del fenómeno físico, las mediciones no son completamente equivalentes desde el punto de vista estadístico. Este comportamiento es coherente con lo señalado por Miranda (2024), quien reportó que los métodos rápidos de determinación de humedad pueden presentar discrepancias respecto al método gravimétrico, especialmente cuando intervienen características particulares del suelo, como la presencia de finos o variaciones en la distribución del agua dentro de la matriz del material. En este sentido, los resultados de la presente investigación sugieren que el sistema Arduino constituye una herramienta técnicamente útil para la estimación rápida de la humedad, aunque requiere considerar la existencia de un sesgo sistemático durante su aplicación.

Respecto a la precisión y reproducibilidad, el sistema Arduino con sensor HW-080 presentó una desviación estándar de 2.49089 y un coeficiente de variación de 22.14 %, superiores a los obtenidos mediante el método al horno (15.42 %) y el método Speedy (13.74 %). Estos resultados indican una mayor dispersión de las mediciones y, por consiguiente, una precisión inferior respecto a los métodos convencionales. Sin embargo, esta mayor variabilidad no invalida la utilidad práctica del sistema, sino que refleja las limitaciones propias de sensores resistivos de bajo costo empleados en condiciones reales de campo. Estos resultados guardan concordancia con Herrera (2024), quien evidenció que el desempeño de los sensores electrónicos depende en gran medida de la calibración específica para cada tipo de suelo y de la adecuada parametrización de las ecuaciones de conversión, señalando que el empleo de modelos generales puede incrementar la incertidumbre y favorecer la subestimación del contenido de humedad. En consecuencia, los resultados obtenidos ponen de manifiesto la importancia de realizar procesos de calibración específicos para las condiciones geotécnicas del sitio de estudio.



El análisis del sesgo confirma esta interpretación. El sistema Arduino presentó un sesgo promedio de -1.133% respecto al método al horno y de -1.675% frente al método Speedy, con errores porcentuales medios de 10.05% y 13.85% , respectivamente. Estos valores evidencian que el sensor tiende a subestimar sistemáticamente el contenido de humedad del suelo, siendo la discrepancia menor cuando se compara con el método gravimétrico. Este comportamiento coincide conceptualmente con los resultados de Miranda (2024), quien reportó diferencias entre métodos rápidos y el método de estufa, así como con Herrera (2024), quien atribuyó este tipo de desviaciones a la utilización de ecuaciones de calibración no ajustadas a las características particulares del suelo. En consecuencia, el sesgo observado no representa necesariamente una limitación del sistema, sino un comportamiento susceptible de corregirse mediante modelos de calibración locales.

En cuanto a la capacidad de estimación, el sistema Arduino mostró un comportamiento considerablemente satisfactorio. Los modelos de regresión alcanzaron coeficientes de determinación de 98.61% respecto al método al horno y de 93.37% frente al método Speedy, acompañados de correlaciones de Pearson de 0.993 y 0.966 , respectivamente. Estos resultados demuestran que el sensor posee una elevada capacidad para reproducir la tendencia de variación del contenido de humedad, aun cuando las mediciones individuales presenten un sesgo negativo. Esta situación coincide con lo señalado por Carranza, Camacho y Ribiano (2023), quienes concluyeron que los métodos indirectos de estimación de humedad pueden alcanzar elevados niveles de desempeño siempre que sean adecuadamente calibrados y validados frente a métodos de referencia. Desde esta perspectiva, el elevado ajuste estadístico obtenido constituye uno de los principales aportes de la investigación, al demostrar que el sistema Arduino puede utilizarse como una herramienta predictiva para el monitoreo rápido del contenido de humedad del suelo.

Los antecedentes nacionales también respaldan la importancia práctica de disponer de herramientas confiables para la determinación del contenido de humedad. Huamán, Milla y Ávila (2024) demostraron que pequeñas variaciones en la humedad modifican significativamente el valor de soporte California Bearing Ratio (CBR) y la densidad de compactación de los suelos cohesivos. De manera similar, Apaza y Chávez (2023) evidenciaron que el contenido de humedad influye directamente en la deformabilidad de los suelos colapsables, mientras que Aldana (2022) estableció que las variaciones de humedad alteran parámetros dinámicos como el módulo de corte, el módulo de elasticidad



y el amortiguamiento. Estos antecedentes resaltan que la medición rápida y confiable del contenido de humedad constituye un aspecto fundamental para el control de calidad de obras geotécnicas, el diseño de pavimentos y la evaluación del comportamiento mecánico de los suelos, reforzando la importancia de desarrollar alternativas tecnológicas de bajo costo como la propuesta en esta investigación.

En síntesis, los resultados obtenidos permiten concluir que el sistema Arduino con sensor HW-080 constituye un prototipo preliminar con potencial de estimación en las condiciones evaluadas para la determinación in situ del contenido de humedad del suelo. La muy alta correlación con los métodos de referencia y la elevada capacidad de estimación demuestran que el sensor reproduce adecuadamente la variabilidad del contenido de humedad. Sin embargo, la existencia de diferencias estadísticamente significativas, el sesgo negativo observado y la mayor variabilidad relativa indican que el sistema aún no alcanza el nivel de exactitud y precisión de los métodos normalizados ASTM D2216 y ASTM D4944. En consecuencia, su principal fortaleza radica en ofrecer una herramienta portátil, económica y de respuesta inmediata para aplicaciones de campo, especialmente en zonas donde el acceso a laboratorios especializados resulta limitado. Asimismo, los resultados ponen de manifiesto que la implementación de procedimientos de calibración específicos para cada tipo de suelo constituye un requisito indispensable para mejorar la exactitud del sistema y ampliar su aplicabilidad en estudios geotécnicos y de ingeniería civil. Esta interpretación es consistente con la literatura científica revisada, que reconoce el potencial de las tecnologías basadas en Arduino para el monitoreo de variables físicas, pero enfatiza la necesidad de procesos de calibración y validación metrológica para garantizar la confiabilidad de las mediciones.



CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

En atención al objetivo general, se determinó que el sistema Arduino con sensor HW-080 constituye un prototipo preliminar con potencial de estimación en las condiciones evaluadas para la determinación in situ del contenido de humedad del suelo en la progresiva 1+500 del tramo de la carretera de trocha carrozable Taraccasa, Abancay–Apurímac. Ello se sustenta en la adecuada correlación obtenida con los métodos de referencia ($r = 0.993$ respecto al método al horno y $r = 0.966$ respecto al método Speedy), así como en su elevada capacidad de estimación ($R^2 = 98.61\%$ y 93.37% , respectivamente). No obstante, el sistema presentó diferencias estadísticamente significativas, un sesgo negativo y una mayor variabilidad respecto a los métodos convencionales, por lo que su aplicación requiere el uso de una calibración específica para mejorar la exactitud de las mediciones.

Se determinó que existe un adecuado grado de correlación entre los valores de contenido de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y los valores determinados por los métodos al horno y Speedy. Ello se evidencia en los coeficientes de correlación de $r = 0.993$ entre Arduino y método al horno, y de $r = 0.966$ entre Arduino y método Speedy, ambos con significancia estadística. Por tanto, el sistema Arduino reproduce adecuadamente la tendencia de variación de la humedad del suelo, mostrando una relación más estrecha con el método al horno, que constituye la referencia principal.

En relación con el primer objetivo específico, se determinó que existe una correlación lineal positiva, adecuada y estadísticamente significativa entre las mediciones obtenidas mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y las determinadas por los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944). La correlación alcanzó un valor de $r = 0.993$ con el método al horno y $r = 0.966$ con el método Speedy ($p < 0.001$), evidenciando que el sistema Arduino reproduce de manera consistente la variación del contenido de humedad del suelo.



Respecto al segundo objetivo específico, la comparación estadística mediante la prueba t para muestras relacionadas evidenció diferencias estadísticamente significativas entre las mediciones del sistema Arduino y los métodos de referencia. Se obtuvo una diferencia promedio de -1.133% respecto al método al horno ($t = -6.17$; $p < 0.001$) y de -1.675% respecto al método Speedy ($t = -6.45$; $p < 0.001$), concluyéndose que el sistema Arduino tiende a subestimar el contenido de humedad del suelo en comparación con ambos métodos convencionales.

En atención al tercer objetivo específico, se estableció que el sistema Arduino con sensor HW-080 presenta una precisión y reproducibilidad inferiores a las obtenidas mediante los métodos al horno y Speedy, al registrar una desviación estándar de 2.49089 y un coeficiente de variación de 22.14% , superiores a los del método al horno (15.42%) y del método Speedy (13.74%). Estos resultados indican una mayor dispersión de las mediciones del sensor, aunque sin comprometer su utilidad para aplicaciones de monitoreo rápido en campo.

En respuesta al cuarto objetivo específico, se determinó que el sistema Arduino con sensor HW-080 presenta un sesgo negativo promedio de -1.133% respecto al método al horno y de -1.675% respecto al método Speedy, evidenciando una tendencia sistemática a subestimar el contenido de humedad del suelo. Sin embargo, el sistema mostró una adecuada capacidad de estimación, con coeficientes de determinación de 98.61% frente al método al horno y 93.37% frente al método Speedy, lo que demuestra que reproduce adecuadamente la tendencia del contenido de humedad y constituye una herramienta útil para la estimación rápida de este parámetro, siempre que se aplique una calibración apropiada.



6.2 Recomendaciones

- **Primera.** Se recomienda implementar el sistema Arduino con sensor HW-080 como una herramienta de apoyo para la determinación rápida del contenido de humedad del suelo durante los ensayos in situ, especialmente en actividades de reconocimiento geotécnico, control preliminar de obras viales y monitoreo de campo, donde se requiera obtener resultados inmediatos con un costo operativo reducido.
- **Segunda.** Se recomienda realizar una calibración específica para cada tipo de suelo antes de utilizar el sistema Arduino con sensor HW-080, empleando como patrón de referencia el método gravimétrico conforme a la norma ASTM D2216, debido a que la investigación evidenció un sesgo negativo sistemático y diferencias estadísticamente significativas respecto a los métodos convencionales. Esta calibración permitirá mejorar la exactitud y reducir el error de las mediciones.
- **Tercera.** Se recomienda ampliar futuras investigaciones considerando un mayor número de muestras, diferentes tipos de suelo, condiciones de humedad y zonas geográficas, con la finalidad de validar el comportamiento del sistema Arduino en diversos escenarios geotécnicos y desarrollar modelos de calibración de aplicación más general.
- **Cuarta.** Se recomienda incorporar sensores de humedad de mayor resolución o combinar el sistema Arduino con algoritmos de calibración basados en modelos estadísticos o técnicas de inteligencia artificial, con el propósito de reducir la variabilidad observada, incrementar la precisión de las mediciones y mejorar la capacidad predictiva del sistema.
- **Quinta.** Se recomienda evaluar el desempeño del sistema Arduino con sensor HW-080 durante la ejecución de obras civiles, integrándolo con otros parámetros geotécnicos, como densidad, grado de compactación, CBR, límites de consistencia y resistencia al corte, a fin de desarrollar sistemas integrales de monitoreo que contribuyan a optimizar el control de calidad de materiales de subrasante y otras aplicaciones en ingeniería civil.
- **Sexta.** Se recomienda que futuras investigaciones comparen el sistema Arduino con otros métodos instrumentales de medición de humedad, como sensores capacitivos,

sensores TDR (Time Domain Reflectometry), sensores FDR (Frequency Domain Reflectometry) y equipos de microondas, con el objetivo de establecer el nivel de desempeño relativo del sensor HW-080 frente a tecnologías de mayor precisión y ampliar las alternativas para la medición rápida del contenido de humedad del suelo.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDELMONEIM, A. A.; AL KALAANY, C. M.; KHADRA, R.; DERARDJA, B. y DRAGONETTI, G.** Calibration of low-cost capacitive soil moisture sensors for irrigation management applications. *Sensors*. 2025, vol. 25, n.º 2, art. 343. DOI: <https://doi.org/10.3390/s25020343>.
- ADLA, S.; BRUCKMAIER, F.; ARIAS-RODRÍGUEZ, L. F.; TRIPATHI, S.; PANDE, S. y DISSE, M.** Impact of calibrating a low-cost capacitance-based soil moisture sensor on AquaCrop model performance. *Journal of Environmental Management*. 2024, vol. 353, art. 120248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120248>.
- ALAHNA, J. A. y MOREIRA, I.** Desarrollo de un sistema de monitoreo inalámbrico de temperatura y humedad aplicado a un sistema de riego en zonas rurales basado en Arduino y comunicación LoRaWAN [en línea]. 2025 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/30432>.
- ALDANA G., R. F.** Efecto de la humedad en el comportamiento dinámico de suelos finos, barrio San Carlos, distrito de Huancayo, año 2022 [en línea]. Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Civil. Huancayo: Universidad Nacional del Centro del Perú, Facultad de Ingeniería Civil, 2024 [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: <https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-del-centro-del-peru/conservacion-de-suelos-y-aguas/t010-75047512-t-estudio-de-suelos/112821107>.
- ALFAIOT.** ¿Qué es Arduino? ¿Para qué sirve? Todo lo que necesitas saber [en línea]. 2024 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <https://alfaiot.com/iot/que-es-arduino-todo-lo-que-necesitas-saber/>.
- ALMEIDA, S.** Implementación de un sistema de monitoreo de temperatura y humedad mediante un ESP32 con notificaciones en Telegram y visualización en Grafana [en línea]. 2025 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/26458>.
- AL-RAWI, M. A. M.** Low-cost soil moisture sensors' assessment for their accuracy after calibration through the gravimetric method. *SABRAO Journal of Breeding and Genetics*. 2024, vol. 56, n.º 1, pp. 353–369. DOI: <https://doi.org/10.54910/sabrao2024.56.1.32>.
- ALVA, J. E.** *Dinámica de suelos*. 1. ed. Lima: Fondo Editorial UNI, 2020.



- APAZA, C. C. y CHÁVEZ, R. J.** Determinación del contenido de humedad y su relación con la deformación del suelo en el asentamiento humano Urbanización Nueva Locumba, Jorge Basadre, Tacna, 2023 [en línea]. 2023 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <http://repositorio.upt.edu.pe/handle/20.500.12969/3224>.
- ARDUINO.** Arduino Hardware [en línea]. 2024 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <https://www.arduino.cc/en/hardware/>.
- ARIAS, F. G.** *El proyecto de investigación: Guía para su elaboración*. 3. ed. Caracas: Editorial Episteme, 1999. ISBN 980-07-3868-1.
- ARIAS, F. G.** *El proyecto de investigación: Introducción a la metodología científica*. 6. ed. Caracas: Episteme, 2012.
- ASTM INTERNATIONAL.** Standard Test Method for Field Determination of Water (Moisture) Content of Soil by the Calcium Carbide Gas Pressure Tester [en línea]. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2018 [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1520/D4944-18>.
- ASTM INTERNATIONAL.** ASTM D2216-19. *Standard Test Methods for Laboratory Determination of Water (Moisture) Content of Soil and Rock by Mass*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2019.
- AULA21.** Arduino: guía completa para principiantes y expertos [en línea]. 2024 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <https://www.cursosaula21.com/arduino-todo-lo-que-necesitas-saber/>.
- BOGENA, H. R.; HUISMAN, J. A.; OBERDÖRSTER, C. y VEREECKEN, H.** Evaluation of a low-cost soil water content sensor for wireless network applications [en línea]. Journal of Hydrology. 2007, vol. 344, n.os 1–2, pp. 32–42 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.032>
- BOWLES, J. E.** *Manual de laboratorio de suelos*. México: McGraw-Hill, 1981.
- BUDHU, M.** *Soil Mechanics and Foundations*. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. ISBN 978-1-118-56399-1.
- CARRANZA-DÍAZ, A. K.; CAMACHO-TAMAYO, J. H. y RUBIANO-SANABRIA, Y.** Validación de un modelo para la estimación del contenido de agua del suelo mediante espectroscopía en el infrarrojo cercano [en línea]. Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica. 2023, vol. 26, n.º 1, art. e2329 [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.31910/rudca.v26.n1.2023.2329>



- CASTILLO, R.** *La ingeniería de suelos*. México: Limusa, 2005. ISBN 9681800540.
- CHOWDHURY, S.; SEN, S. y JANARDHANAN, S.** Comparative Analysis and Calibration of Low Cost Resistive and Capacitive Soil Moisture Sensor [en línea]. arXiv. 2022 [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: <https://arxiv.org/abs/2210.03019>
- CIRKIT DESIGNER.** How to Use Soil Sensor HW-080: Examples, Pinouts, and Specifications [en línea]. 2024 [consulta: 5 julio 2026]. Disponible en: <https://docs.circuitdesigner.com/component/2086f9fa-9393-4a9d-8e53-0106572d3e71/soil-sensor-hw-080>.
- CODUTO, D. P.; YEUNG, M. C. R. y KITCH, W. A.** *Geotechnical Engineering: Principles and Practices*. 2nd ed. Boston: Pearson, 2016. ISBN 978-0-13-236868-1.
- CONSEJO NACIONAL DE CIENCIA, TECNOLOGÍA E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA (CONCYTEC).** *Código Nacional de la Integridad Científica*. Lima: CONCYTEC, 2020.
- DAS, B. M.** *Fundamentos de ingeniería geotécnica*. 7. ed. México: Cengage Learning, 2013.
- DAS, B. M.** *Principles of Foundation Engineering*. 8th ed. Boston: Cengage Learning, 2016. ISBN 978-1-305-97594-1.
- DAS, B. M. y SOBHAN, K.** *Principles of Geotechnical Engineering*. 9th ed. Boston: Cengage Learning, 2018. ISBN 978-1-337-70973-6.
- DEPARTAMENTO DE TECNOLOGÍAS IES.** ARDUINO [en línea]. [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: <https://ro.scribd.com/document/922600385/Tema-3-Arduino>.
- DUQUE, G. y ESCOBAR, C. E.** *Mecánica de los suelos*. Manizales: Universidad Nacional de Colombia, 2002.
- FARIDAH, S. N.; SAPSAL, M. T.; JAMALUDDIN, T. A. A.; ACHMAD, A. D. y SURYA, M. A.** Stability of soil moisture sensors for agricultural crop cultivation [en línea]. Research in Agricultural Engineering. 2025, vol. 71, n.º 2, pp. 88–94 [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.17221/33/2024-RAE>
- GRANALES, T.** *Tipos de investigación*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia, 2000.
- HANDSON TECHNOLOGY.** *Soil Moisture Sensor Module: Data Specs* [en línea]. Penang: Handson Technology, 2019 [consulta: 5 julio 2026]. Disponible en: <https://handsontec.com/dataspecs/sensor/Soil%20Moisture%20Sensor.pdf>
- HERNÁNDEZ-SAMPIERI, R.; FERNÁNDEZ-COLLADO, C. y BAPTISTA-LUCIO, M. P.** *Metodología de la investigación*. 6. ed. México: McGraw-Hill Education, 2014. ISBN 978-1-4562-2396-0.



- HERRERA ARIAS, M. F.** Calibración de sensores de humedad del suelo con validación de campo: calibración de sensores de humedad del suelo “PT91” El Arenal [en línea]. Trabajo de Integración Curricular. Quito: Escuela Politécnica Nacional, 2024 [consulta: 10 septiembre 2025]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/25916>
- HUAMAN LIVIA, A.; MILLA VERGARA, E. y PAGOLA ÁVILA, D.** El contenido de humedad y el valor de soporte en suelos cohesivos en el distrito de Independencia [en línea]. Aporte Santiaguino. 2024, vol. 17, n.º 2, pp. 173–182 [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.32911/as.2024.v17.n2.1171>
- JUÁREZ BADILLO, E. y RICO RODRÍGUEZ, A.** *Mecánica de suelos Tomo II: Teoría y aplicaciones de la mecánica de suelos*. 2. ed. México: Limusa, 1997. ISBN 968-18-05283.
- JUÁREZ BADILLO, E. y RICO RODRÍGUEZ, A.** *Fundamentos de mecánica de suelos. Tomo I*. 5. ed. México: Limusa, 2005. ISBN 968-18-0061-3.
- LAMBE, T. W. y WHITMAN, R. V.** *Mecánica de suelos*. México: Limusa, 2004.
- LI, B.; YOU, Z.; NI, K. y WANG, Y.** Prediction of Soil Compaction Parameters Using Machine Learning Models. *Applied Sciences*. 2024, vol. 14, n.º 7, art. 2716. DOI: <https://doi.org/10.3390/app14072716>.
- LU, N. y LIKOS, W. J.** *Unsaturated Soil Mechanics*. Hoboken: John Wiley & Sons, 2004. ISBN 978-0-471-44731-3.
- MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES (MTC).** Manual de carreteras: Suelos, geología, geotecnia y pavimentos. Sección: Suelos y Pavimentos [en línea]. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2014 [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: https://portal.mtc.gob.pe/transportes/caminos/normas_carreteras/mtc%20normas/arch_p df/man_7%20sggp-2014.pdf.
- MIRANDA, R.** Análise comparativa para determinação do teor de umidade de solo pelos métodos da estufa, frigideira, Speedy Test e balança infravermelho [en línea]. Monografia (Graduação em Engenharia Civil). Ouro Preto: Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, 2024 [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: <http://www.monografias.ufop.br/handle/35400000/6986>.
- MONJE ÁLVAREZ, C. A.** *Metodología de la investigación cuantitativa y cualitativa: Guía didáctica*. Neiva: Universidad Surcolombiana, 2011.



NANDI, R. y SHRESTHA, D. Assessment of Low-Cost and Higher-End Soil Moisture Sensors across Various Moisture Ranges and Soil Textures. *Sensors*. 2024, vol. 24, n.º 18, art. 5886.

DOI: <https://doi.org/10.3390/s24185886>

ORGANIZACIÓN PARA LA COOPERACIÓN Y EL DESARROLLO ECONÓMICOS (OCDE). *Oslo Manual 2018: Guidelines for Collecting, Reporting and Using Data on Innovation*. 4th ed. Paris: OECD Publishing, 2018. ISBN 978-92-64-30460-4. DOI: <https://doi.org/10.1787/9789264304604-en>.

OSANAIYE, O. A.; MANNAN, T. y AINA, F. An IoT-based soil moisture monitor [en línea]. *African Journal of Science, Technology, Innovation and Development*. 2022, vol. 14, n.º 7, pp. 1908–1915 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/20421338.2021.1988413>

PCBSYNC. *Soil Moisture Sensor Arduino: Complete Guide to Garden Monitoring* [en línea]. 2025 [consulta: 5 julio 2026]. Disponible en: <https://www.pcbsync.com/>

PITORO, V. S. J.; DE AMORIM, C. A.; FRANCO, J. R. y SÁNCHEZ-ROMÁN, R. M. Application of Low-Cost Soil Moisture Sensors for Irrigation Management in *Brassica oleracea* var. *acephala* Cultivation. *Smart Agricultural Technology*. 2025, vol. 12, art. 101596. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2025.101596>.

RAHEJA, A.; SHARDA, R.; GARG, S.; KAUR, S.; DAS, S. y CHOUDHARY, O. P. Designing and Field Calibration of Low-Cost Microcontroller-Based Soil Moisture Sensor for Subsurface Drip-Irrigation System. *Scientific Reports*. 2025, vol. 15, art. 35948. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81288-z>.

RASTI, A.; PINEDA, M. y RAZAVI, M. Assessment of soil moisture content measurement methods: conventional laboratory oven versus halogen moisture analyzer. *Journal of Soil and Water Science*. 2020, vol. 4, n.º 1, pp. 151–160. DOI: [10.36959/624/440](https://doi.org/10.36959/624/440).

ROBINSON, D. A.; CAMPBELL, C. S.; HOPMANS, J. W.; HORNBUCKLE, B. K.; JONES, S. B.; KNIGHT, R.; OGDEN, F.; SELKER, J. y WENDROTH, O. Soil Moisture Measurement for Ecological and Hydrological Watershed-Scale Observatories: A Review. *Vadose Zone Journal*. 2008, vol. 7, n.º 1, pp. 358–389. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2007.0143>.

RODRÍGUEZ, W. *Guía de investigación científica*. Lima: Universidad Alas Peruanas, 2011.

SABINO, C. *El proceso de investigación*. Caracas: Editorial Panapo, 1992. ISBN 980-07-1101-5.



SCHWAMBACK, D.; PERSSON, M.; BERNDTSSON, R.; BERTOTTO, L. E.; KOBAYASHI, A. N. A. y WENDLAND, E. C.

Automated low-cost soil moisture sensors: trade-off between cost and accuracy [en línea]. *Sensors*. 2023, vol. 23, n.º 5, art. 2451 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.3390/s23052451>.

SEYFRIED, M. S. y MURDOCK, M. D. Measurement of Soil Water Content with a 50-MHz Soil Dielectric Sensor. *Soil Science Society of America Journal*. 2004, vol. 68, n.º 2, pp. 394–403. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2004.3940>.

SUÁREZ, J. *Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales*. Bucaramanga: Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos, 1998.

TERZAGHI, K.; PECK, R. B. y MESRI, G. *Soil Mechanics in Engineering Practice*. 3rd ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. ISBN 978-0-471-08658-1.

UTEST MATERIAL TESTING EQUIPMENT. Medidor de humedad (tipo Speedy): medidor de humedad en el campo [en línea]. 2024 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <https://www.utest.com.tr/es/25725/Medidor-de-Humedad-Tipo-Speedy>

VERECKEN, H.; HUISMAN, J. A.; BOGENA, H. R.; VANDERBORGHT, J.; VRUGT, J. A. y HOPMANS, J. W. On the Value of Soil Moisture Measurements in Vadose Zone Hydrology: A Review. *Water Resources Research*. 2008, vol. 44, W00D06. DOI: <https://doi.org/10.1029/2008WR006829>.

VERRUIJT, A. *An Introduction to Soil Mechanics* [en línea]. 2nd ed. Cham: Springer, 2018 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-319-61185-3>.

VIAL, G. *Glosario de términos de uso frecuente en proyectos de infraestructura vial*. Lima: Ministerio de Transportes y Comunicaciones, 2013.

VILLALOBOS, F. *Mecánica de suelos*. Santiago de Chile: Ediciones UC, 2016. ISBN 978-956-7943-71-5.

VINUESA, P. Correlación: teoría y práctica [en línea]. 2016 [consulta: 10 junio 2025]. Disponible en: <http://www.ccg.unam.mx/~vinuesa/>

WANG, X.; BOUZEMBRAK, Y.; LANSINK, A. G. J. M. O. y VAN DER FELS-KLERX, H. J. Application of Machine Learning to the Monitoring and Prediction of Food Safety: A Review. *Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety*. 2022, vol. 21, n.º 1, pp. 37–65. DOI: <https://doi.org/10.1111/1541-4337.12868>.



YU, L.; GAO, W.; SHAMSHIRI, R. R.; TAO, S.; REN, Y.; ZHANG, Y. y SU, G. Review of research progress on soil moisture sensor technology [en línea]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering. 2021, vol. 14, n.º 4, pp. 32–42 [consulta: 20 junio 2025]. Disponible en: <https://doi.org/10.25165/j.ijabe.20211404.6404>



ANEXOS



Anexo A

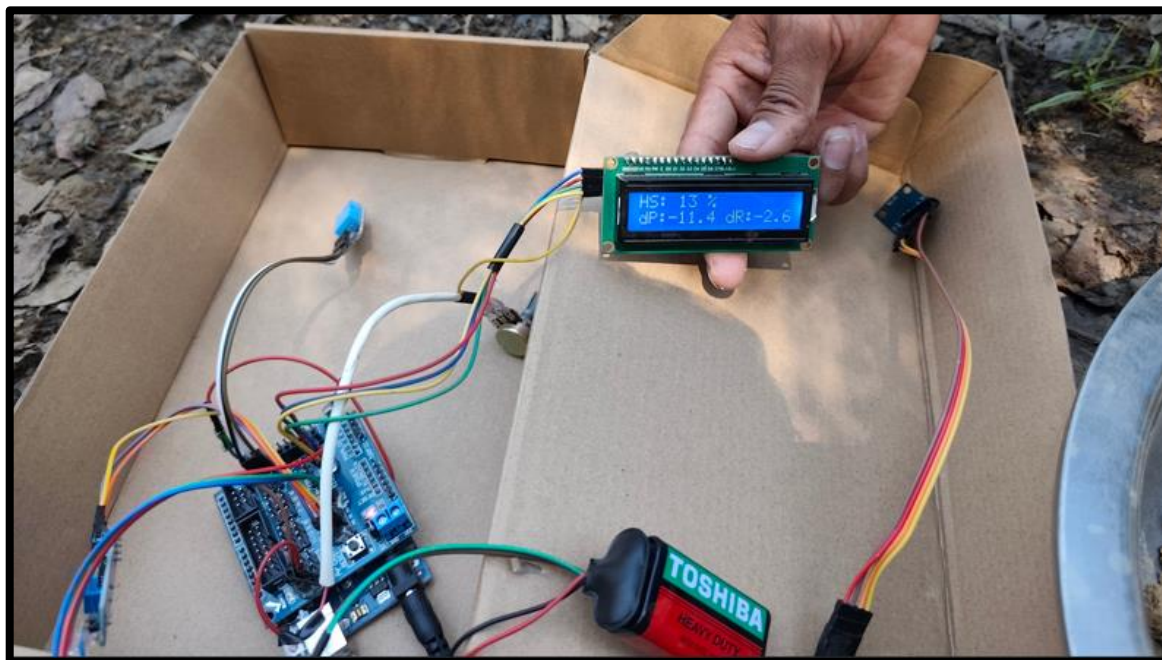
Tabla 21 — Matriz de consistencia

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variables	Dimensiones	Indicadores	Metodología
Problema general ¿En qué medida el sistema basado en Arduino con sensor HW-080 permite determinar de manera confiable el contenido de humedad del suelo in situ, en comparación con los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) en Apurímac, 2025?	Objetivo general Evaluar en qué medida el sistema basado en Arduino con sensor HW-080 permite determinar de manera confiable el contenido de humedad del suelo in situ, mediante su comparación con los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944) en Apurímac, 2025.	Hipótesis general El sistema basado en Arduino con sensor HW-080 permite determinar de manera confiable el contenido de humedad del suelo in situ, al presentar resultados comparables con los obtenidos mediante los métodos al horno (ASTM D2216) y Speedy (ASTM D4944).	Variable independiente Método de medición del contenido de humedad del suelo.	Método al horno ASTM D2216. Método Speedy ASTM D4944. Sistema Arduino HW-080.	Valor de humedad (%).	Tipo: Aplicada. Enfoque: Cuantitativo. Nivel: Explicativo. Diseño: Experimental comparativo, transversal.
Problemas específicos • ¿Cuál es el grado de correlación entre los valores de contenido de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y los valores determinados por los métodos al horno y Speedy durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025?	Objetivos específicos • Determinar el grado de correlación entre los valores de contenido de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y los valores determinados por los métodos al horno y Speedy durante los ensayos de campo.	Hipótesis específicas • Existe una correlación positiva, alta y estadísticamente significativa entre los valores de contenido de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y los valores determinados por los métodos al horno y Speedy durante los ensayos de campo	Variable dependiente Confiabilidad de la medición del contenido de humedad del suelo.	Correlación	Coefficiente de correlación de Pearson (r). Coefficiente de determinación (R ²). Bland–Altman (si aplica).	Estadística descriptiva. Correlación de Pearson.
• ¿Existe diferencias estadísticamente	• Comparar estadísticamente las	• No existen diferencias estadísticamente	Variable dependiente	Diferencias.	Desviación estándar.	Estadística descriptiva.

significativas entre las mediciones del contenido de humedad del suelo obtenidos mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 y las obtenidas mediante los métodos al horno y Speedy durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025?	mediciones de humedad obtenidas mediante el sistema Arduino con sensor HW-080 con los métodos al horno y Speedy en Apurímac, 2025	significativamente entre las mediciones del contenido de humedad del suelo obtenidas mediante los métodos al horno y Speedy durante los ensayos de campo			Coeficiente de variación. Estadística de prueba T, Error estándar.	Comparación de dispersión. Prueba t de student
¿Qué niveles de precisión y reproducibilidad presenta el sistema Arduino con sensor HW-080 en la determinación del contenido de humedad del suelo, en comparación con los métodos de referencia al horno y Speedy durante los ensayos de campo en Apurímac, 2025?	Evaluar los niveles de precisión y reproducibilidad del sistema Arduino con sensor HW-080 En la determinación del contenido de humedad del suelo, en comparación con los métodos de referencia al horno y Speedy.	El sistema Arduino con sensor HW-080 presenta niveles adecuados de precisión y reproducibilidad en la determinación del contenido de humedad del suelo, comparables a los obtenidos mediante los métodos de referencia los ensayos de campo.	Variable dependiente	Precisión. Reproducibilidad	Desviación estándar. Coeficiente de variación. Error estándar.	Estadística descriptiva. Comparación de dispersión
¿Cuál es el sesgo y la capacidad de estimación del sistema Arduino con sensor HW-080 respecto a los métodos al horno y Speedy en la	Analizar el sesgo y la capacidad de estimación del sistema Arduino con sensor HW-080 respecto a los métodos al horno y	El sistema Arduino con sensor HW-080 presenta un sesgo reducido y una adecuada capacidad de estimación respecto a los métodos	Variable dependiente	Sesgo. Capacidad de estimación.	Sesgo medio. Intercepto. Pendiente. R ² . RMSE. MAE.	Regresión lineal. Análisis del sesgo.

Anexo B

PANEL FOTOGRÁFICO DEL PROCESO DE EJECUCIÓN DE LA INVESTIGACIÓN



NOTA

La fotografía muestra el proceso de construcción y ensamblaje de un sistema prototipo basado en Arduino para la determinación directa e in situ de la humedad del suelo mediante el sensor HW-080. Se observa una placa Arduino interconectada con diversos conductores eléctricos, una pantalla LCD para la visualización inmediata de los datos y los componentes auxiliares necesarios para la alimentación y transmisión de señales del sistema. La disposición de los elementos evidencia una etapa de integración funcional del dispositivo, en la que se verifica la conexión entre el sensor, la unidad de procesamiento y el módulo de visualización, permitiendo registrar y mostrar en tiempo real los valores de humedad del suelo. Esta configuración representa una fase clave del desarrollo experimental, orientada a validar el funcionamiento operativo del equipo en condiciones de campo y a demostrar su aplicabilidad como alternativa tecnológica para la medición rápida, directa y práctica de la humedad del suelo.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 23 — Del proceso de construcción del nuevo sensor HW-080



NOTA

La imagen presenta un acercamiento al módulo de visualización LCD integrado al sistema Arduino durante el proceso de construcción del prototipo para la medición in situ de la humedad del suelo con el sensor HW-080. En la pantalla se observan los campos destinados al registro de temperatura (Temp) y humedad (Hum), lo que evidencia la etapa de programación, verificación y configuración del sistema de monitoreo. Asimismo, se distinguen los cables de conexión y parte de los componentes electrónicos que enlazan la pantalla con la placa de control, reflejando el proceso de ensamblaje y prueba operativa del dispositivo. Esta imagen representa una fase importante del desarrollo del equipo, en la que se comprueba la correcta comunicación entre los elementos del sistema y la capacidad del prototipo para mostrar en tiempo real las variables medidas, condición esencial para su aplicación práctica en campo.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 24 — Medición de humedad del suelo



NOTA

La fotografía evidencia la fase de aplicación y seguimiento en campo del procedimiento de determinación de humedad del suelo, en la que se observa al asesor supervisando directamente el desarrollo de las actividades experimentales vinculadas al uso del sensor HW-080 con Arduino. Su presencia en el área de ensayo refleja el acompañamiento técnico durante la ejecución de las mediciones, la verificación del procedimiento de muestreo y el control del cumplimiento de las condiciones establecidas para la obtención de datos confiables.

Asimismo, la imagen permite apreciar la aplicación simultánea de otras metodologías de determinación de humedad en campo, utilizadas con fines de comparación y validación de resultados. En la zona de trabajo se distinguen los materiales, equipos y herramientas empleados para la extracción y acondicionamiento de muestras, lo que demuestra que la evaluación no se limita al uso del sensor electrónico, sino que incorpora procedimientos complementarios de medición bajo condiciones reales de campo.

De manera particular, se observa el remarcado con líneas blancas del área de la calicata, delimitación que cumple una función técnica importante, ya que define el espacio de intervención para la extracción ordenada de la muestra de suelo.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 25 — De la aplicación en campo del sensor HW-080



NOTA

La fotografía muestra al investigador en campo durante la ejecución de las pruebas de determinación directa e in situ de la humedad del suelo mediante el uso del sensor HW-080 integrado a un sistema Arduino. Se observa al tesista manipulando el prototipo en condiciones reales de trabajo, mientras realiza la lectura y verificación de los valores obtenidos en el área de muestreo. Asimismo, se aprecia el material de suelo extraído y dispuesto en un recipiente, lo que evidencia el proceso complementario de toma y acondicionamiento de muestras para su análisis y comparación.

La imagen refleja una etapa fundamental del trabajo experimental, ya que documenta la aplicación práctica del dispositivo desarrollado en el entorno natural donde se evalúa su funcionamiento. En este contexto, el uso del sensor HW-080 permite efectuar una medición rápida y directa de la humedad del suelo, constituyéndose en una alternativa tecnológica de apoyo para el control de esta variable en campo.

FUENTE: Elaboración propia

Figura 26 — De la determinación de humedad del suelo



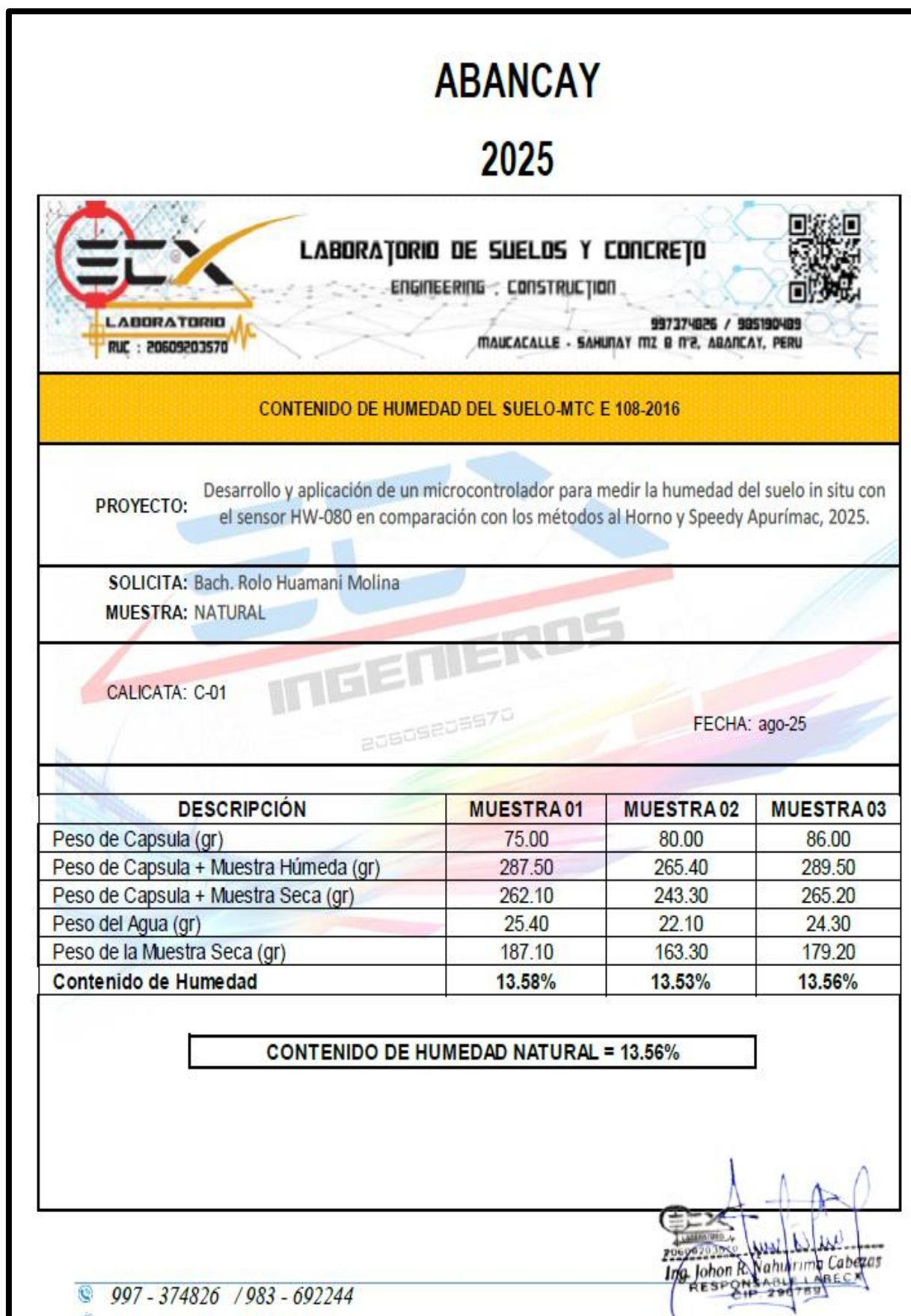
NOTA

La imagen muestra el momento preciso de la determinación de la humedad del suelo a partir de la muestra extraída de la calicata, utilizando el sensor HW-080 acoplado a un sistema Arduino. Se observa que la muestra de suelo ha sido colocada en un recipiente de acero, donde es acondicionada para la lectura correspondiente, mientras que el equipo electrónico empleado para la medición se encuentra dispuesto en una caja de cartón, en la que se integran la placa de control, el sistema de alimentación, las conexiones y la pantalla de visualización de datos.

La fotografía documenta una fase clave del procedimiento de campo, ya que permite evidenciar la interacción entre la muestra extraída y el prototipo desarrollado para registrar la humedad de manera directa. Asimismo, la disposición de los componentes muestra el carácter funcional y operativo del sistema, diseñado para realizar mediciones prácticas en condiciones reales de ensayo. En conjunto, la imagen representa la aplicación del dispositivo en el proceso de evaluación de la humedad del suelo, destacando tanto la preparación de la muestra como la lectura inmediata de los datos mediante el sensor implementado.

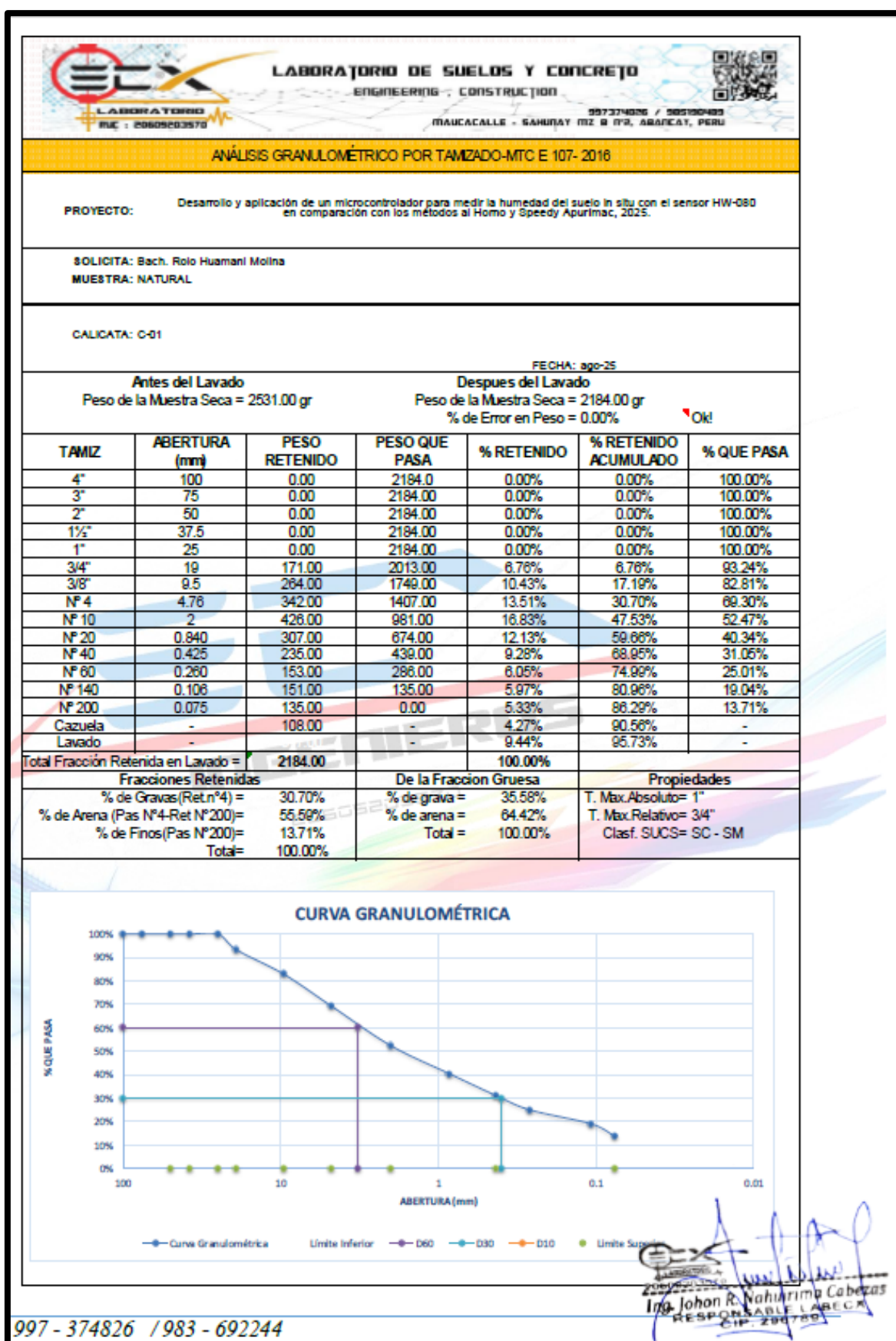
FUENTE: Elaboración propia

Figura 27 — De la aplicación en campo del sensor HW-080



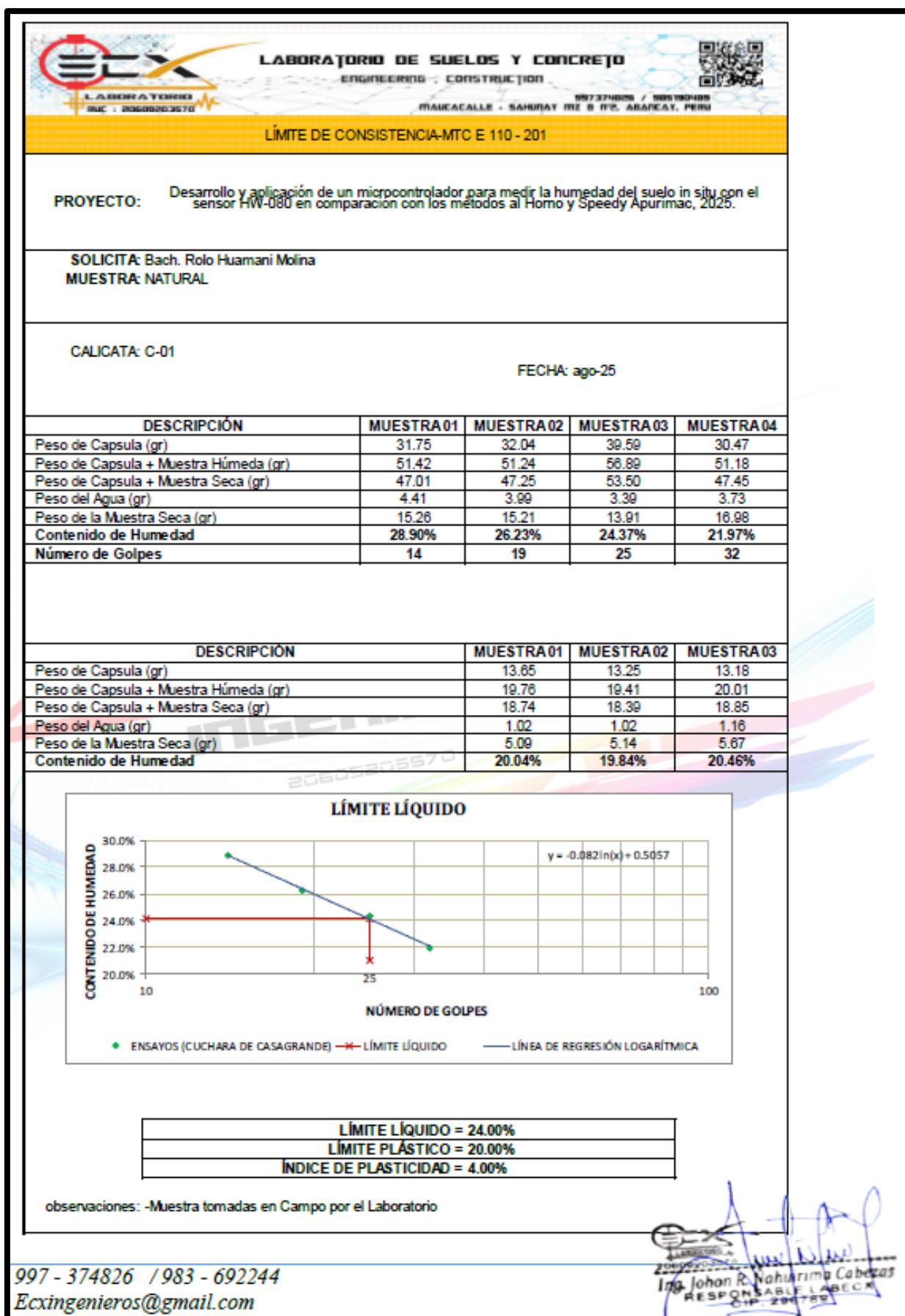
FUENTE: Elaboración propia

Figura 28 — Cálculo del contenido de humedad del suelo en C-1



FUENTE: Elaboración propia

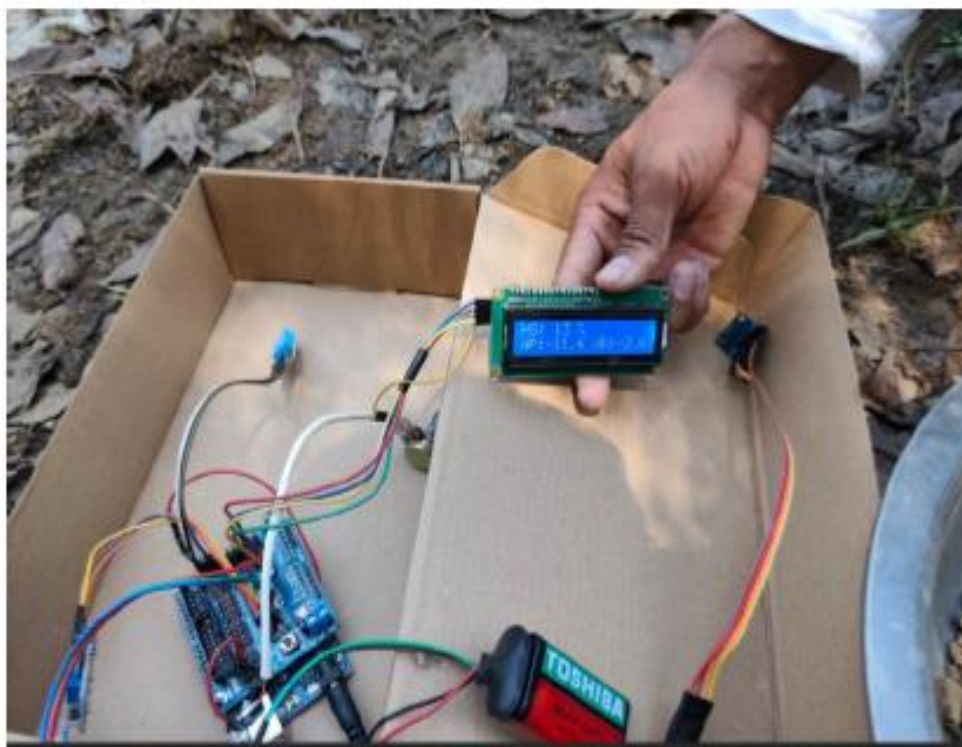
Figura 29 — Cálculo de la curva granulométrica



FUENTE: Elaboración propia

Figura 30 — Cálculo del límite líquido





RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTENIDO DE HUMEDAD (CALICATA C-01)

SENSOR	13%
ENSAYO SPEEDY	13.50%
HUMEDAD HORNO	13.56%

997 - 374826 / 983 - 692244
 Ecxingenieros@gmail.com

[Handwritten signature]
 Ing. Johan R. Nolasco Cabezas
 RESPONSABLE LABORATORIO
 010-2007001

FUENTE: Elaboración propia

Figura 31 — Resultados de C-1 con el sensor HW-080



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING - CONSTRUCTION

RUC : 20609202570



997374026 / 905190409
MAUCACALLE - SANJAY MZ D N°2, ABAJCAY, PERU

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO-MTC E 108-2016

PROYECTO: Desarrollo y aplicación de un microcontrolador para medir la humedad del suelo in situ con el sensor HW-080 en comparación con los métodos al Horno y Speedy Apurímac, 2025.

SOLICITA: Bach. Rolo Huamani Molina
MUESTRA: NATURAL

CALICATA: C-02 **FECHA:** ago-25

DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
Peso de Capsula (gr)	40.00	41.00	40.00
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	275.50	280.40	279.00
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	250.50	237.22	255.00
Peso del Agua (gr)	25.00	23.18	24.00
Peso de la Muestra Seca (gr)	210.50	196.22	215.00
Contenido de Humedad	11.88%	11.81%	11.16%

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL = 11.62%

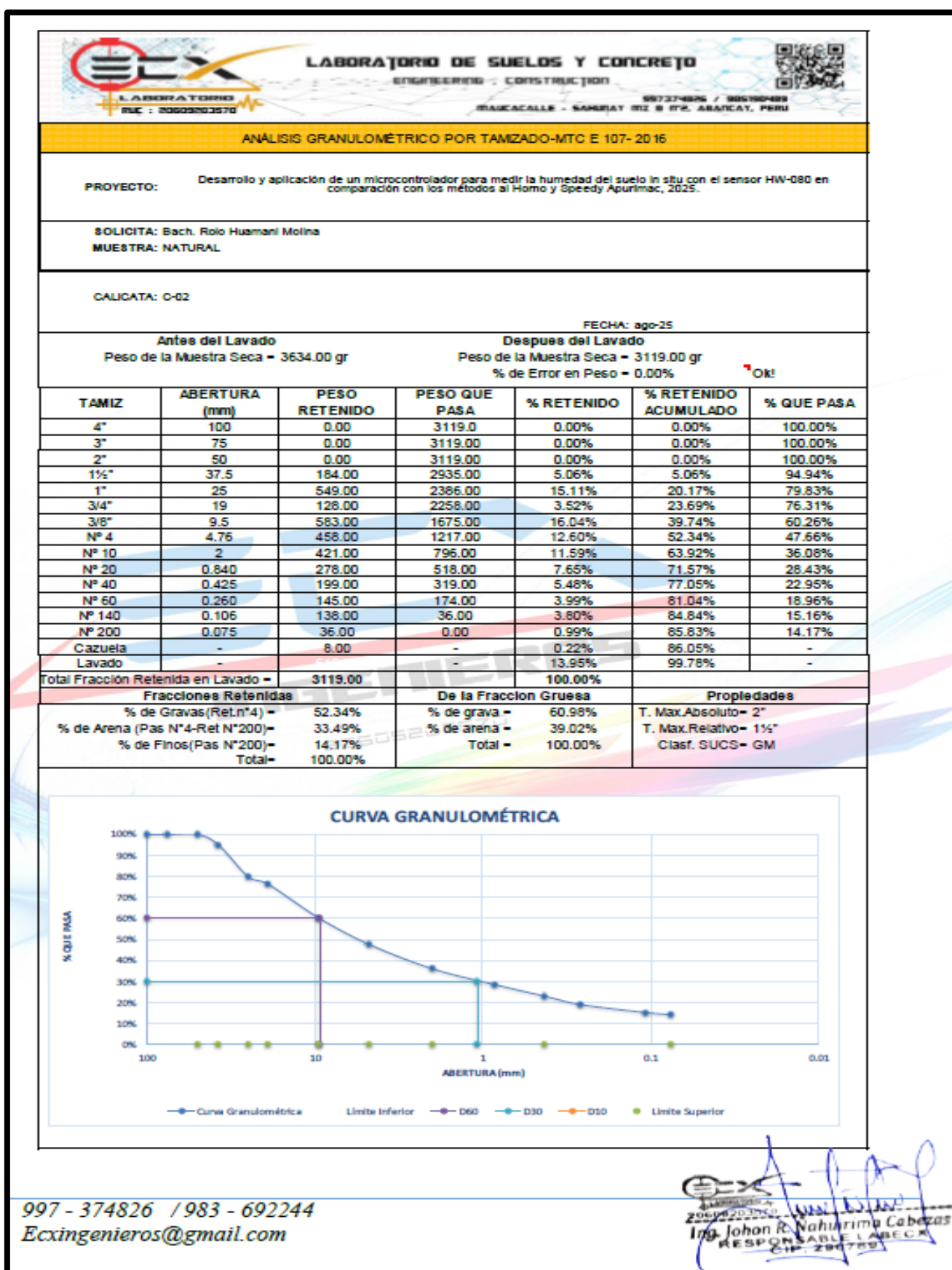
997 - 374826 / 983 - 692244
Ecxingenieros@gmail.com



Ing. Johan R. Natividad Cobos
RESPONSABLE LABORA
SEP-2025

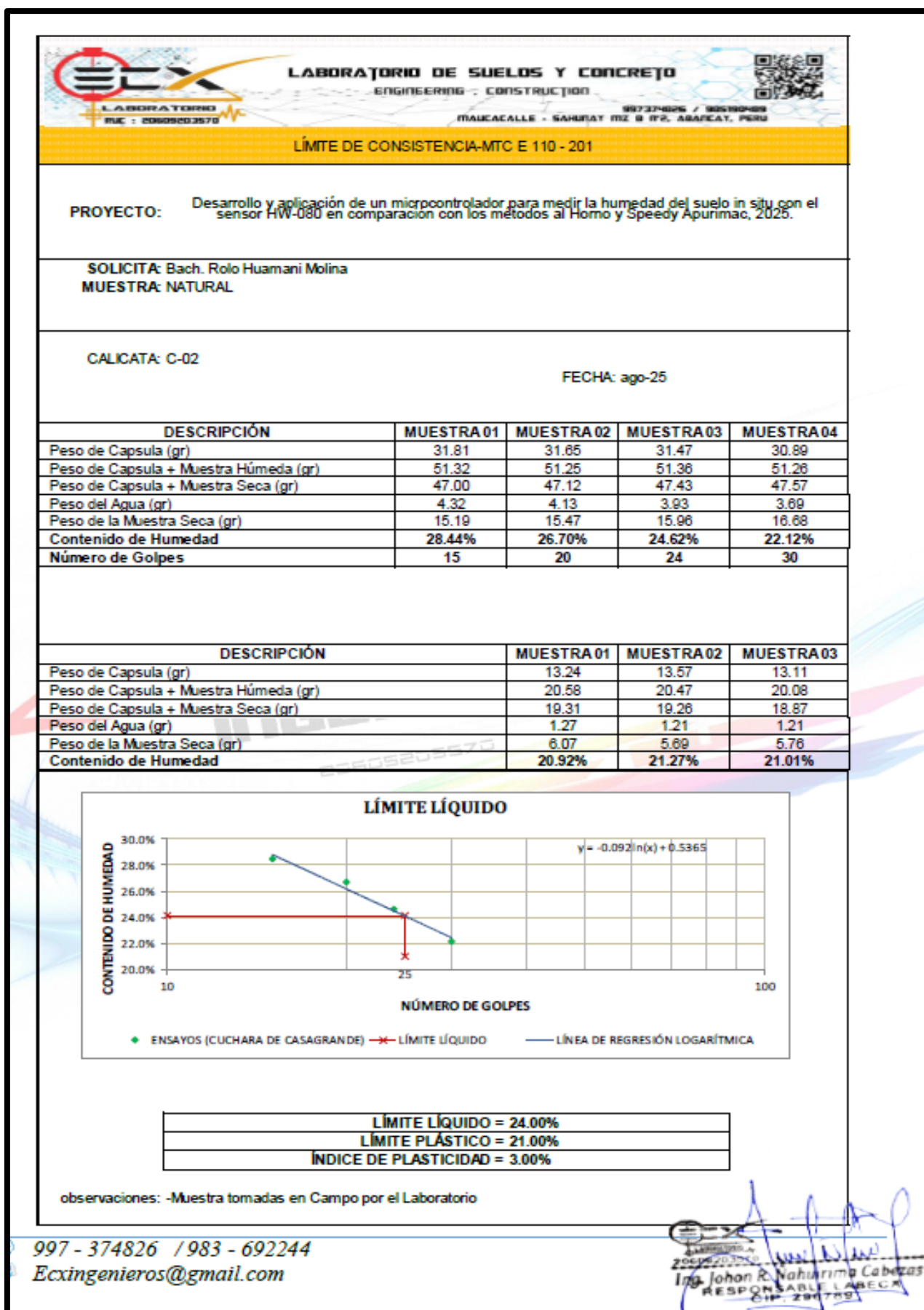
FUENTE: Elaboración propia

Figura 32 — Contenido de humedad de C-2



FUENTE: Elaboración propia

Figura 33 — Curva granulométrica de C-2



FUENTE: Elaboración propia

Figura 34 — Cálculo del límite líquido de C-2



RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTENIDO DE HUMEDAD (CALICATA C-2)

SENSOR	10%
ENSAYO SPEEDY	12.50%
HUMEDAD HORNO	11.62%

997 - 374826 / 983 - 692244
 Ecxingenieros@gmail.com

[Handwritten Signature]
 Ing. Johan R. Nahuarima Cabezas
 RESPONSABLE TÉCNICO
 2019-07-20

FUENTE: Elaboración propia

Figura 35 — Resultados de C-2



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING - CONSTRUCTION
RUC : 20609203570



997374826 / 985190489
MAUCACALLE - SANJAY MZ B N°2, ABAÑICAY, PERU

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO-MTC E 108-2016

PROYECTO: Desarrollo y aplicación de un microcontrolador para medir la humedad del suelo in situ con el sensor HW-080 en comparación con los métodos al Horno y Speedy Apurímac, 2025.

SOLICITA: Bach. Rolo Huamani Molina

MUESTRA: NATURAL

CALICATA: C-03

FECHA: ago-25

DESCRIPCIÓN	MUESTRA 01	MUESTRA 02	MUESTRA 03
Peso de Capsula (gr)	75.00	50.00	60.00
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	280.70	270.40	240.90
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	254.50	242.40	218.00
Peso del Agua (gr)	26.20	28.00	22.90
Peso de la Muestra Seca (gr)	179.50	192.40	158.00
Contenido de Humedad	14.60%	14.55%	14.49%

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL = 14.55%

997 - 374826 / 983 - 692244

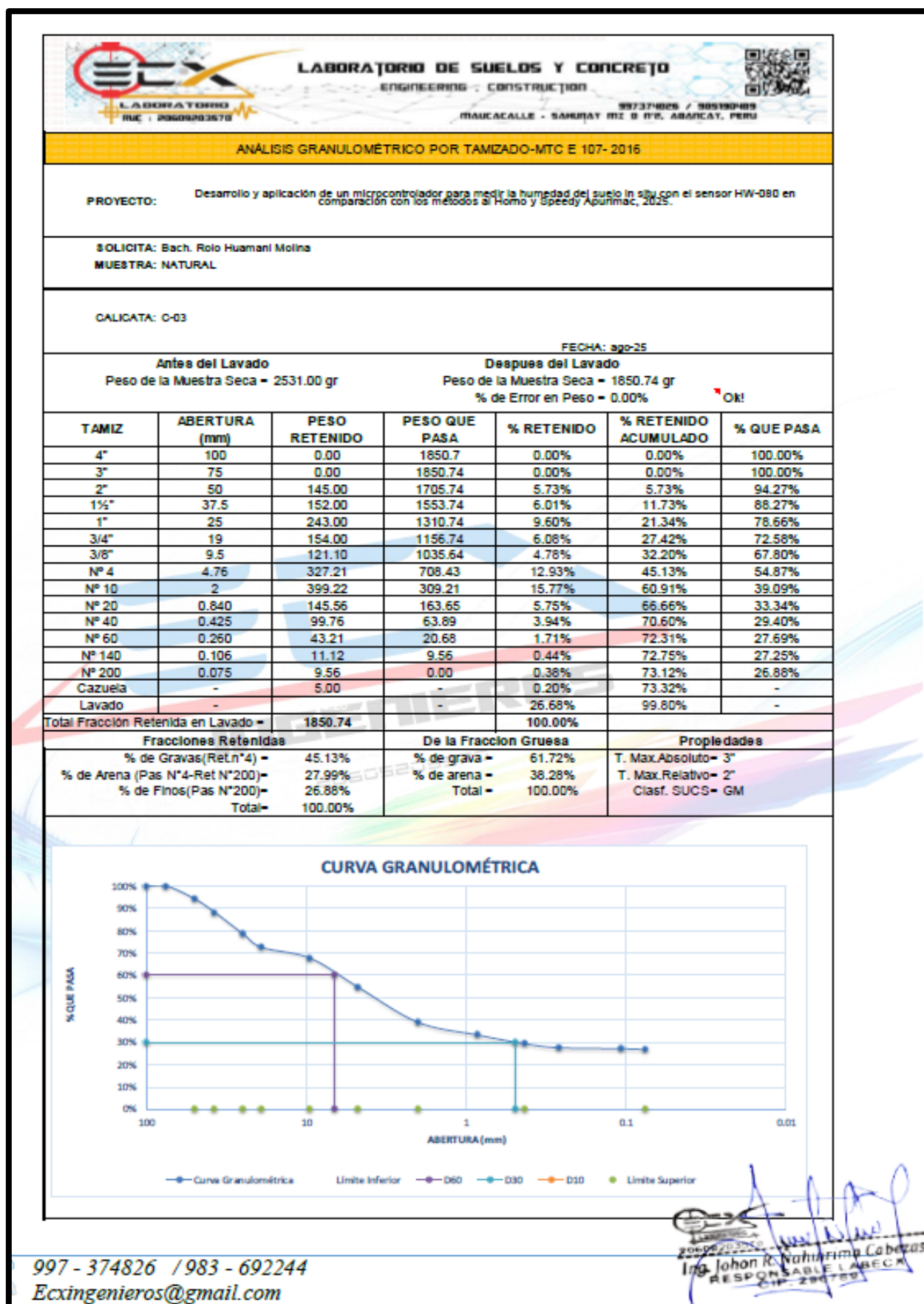
Ecxingenieros@gmail.com



Ing. Johan R. Naharima Cabezas
RESPONSABLE LABORA
CIP. 280780

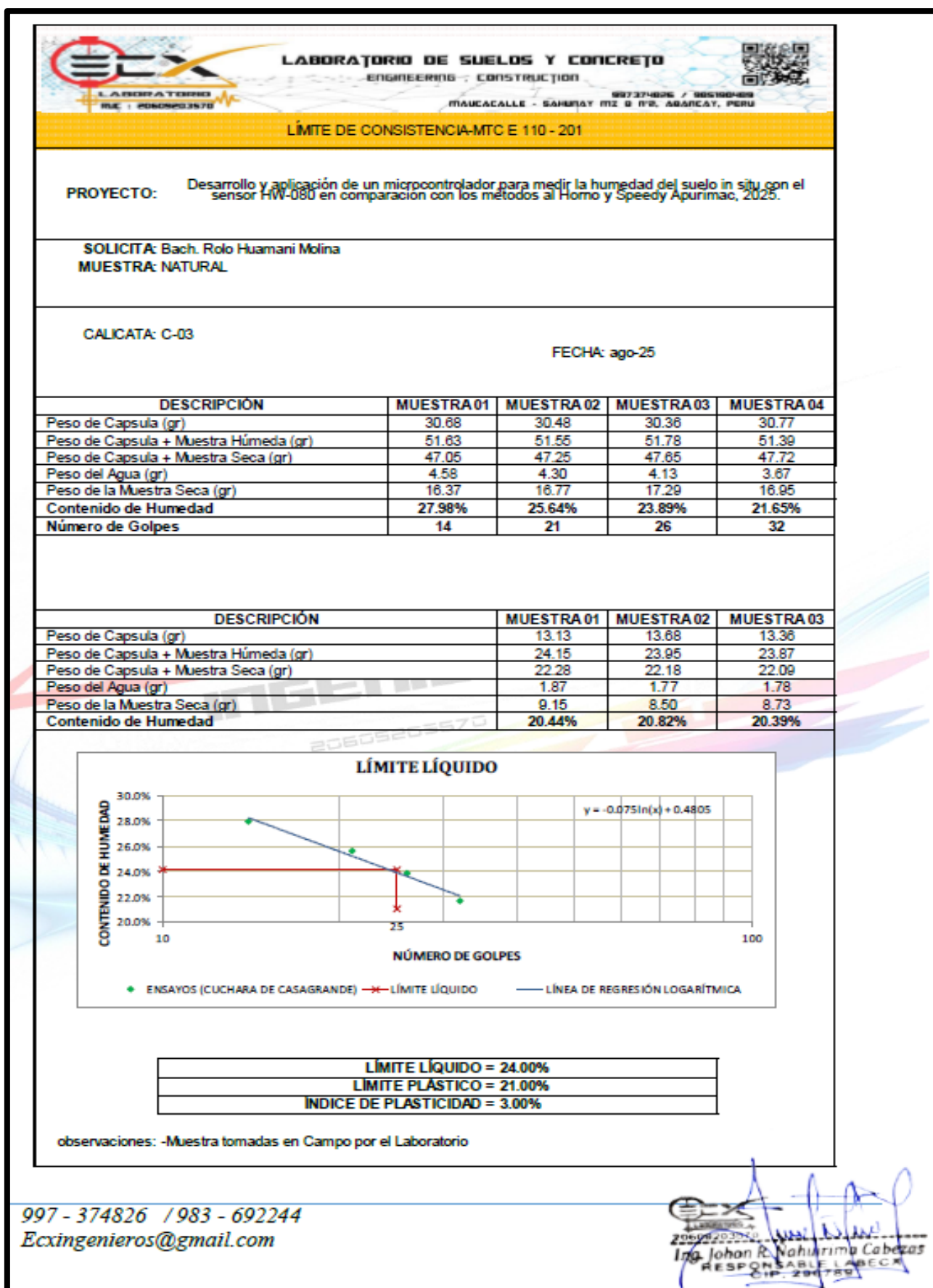
FUENTE: Elaboración propia

Figura 36 — Contenido de humedad C-3



FUENTE: Elaboración propia

Figura 37 — Curva granulométrica C-3



FUENTE: Elaboración propia

Figura 38 — Límite líquido de C-3



RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTENIDO DE HUMEDAD (CALICATA C-03)

SENSOR	14%
ENSAYO SPEEDY	15.20%
HUMEDAD HORNO	14.55%

997 - 374826 / 983 - 692244
 Ecxingenieros@gmail.com

[Handwritten Signature]
 Ing. Johan R. Naharima Cabezas
 RESPONSABLE LADECK
 CIP: 200789

FUENTE: Elaboración propia

Figura 39 — Resultados de C-3



LABORATORIO DE SUELOS Y CONCRETO
ENGINEERING · CONSTRUCTION

RUC : 20609203570



997374826 / 985190489
MAUCACALLE · SANJUAN MZ B N°2, ABAJCAY, PERU

CONTENIDO DE HUMEDAD DEL SUELO-MTC E 108-2016

PROYECTO: Desarrollo y aplicación de un microcontrolador para medir la humedad del suelo in situ con el sensor HW-080 en comparación con los métodos al Horno y Speedy Apurímac, 2025.

SOLICITA: Bach. Rolo Huamani Molina
MUESTRA: NATURAL

CALICATA: C-04 **FECHA:** ago-25

DESCRIPCIÓN	MUESTRA01	MUESTRA02	MUESTRA03
Peso de Capsula (gr)	30.00	30.00	30.00
Peso de Capsula + Muestra Húmeda (gr)	375.00	320.00	310.00
Peso de Capsula + Muestra Seca (gr)	343.90	294.20	285.10
Peso del Agua (gr)	31.10	25.80	24.90
Peso de la Muestra Seca (gr)	313.90	264.20	255.10
Contenido de Humedad	9.91%	9.77%	9.76%

CONTENIDO DE HUMEDAD NATURAL = 9.81%

997 - 374826 / 983 - 692244

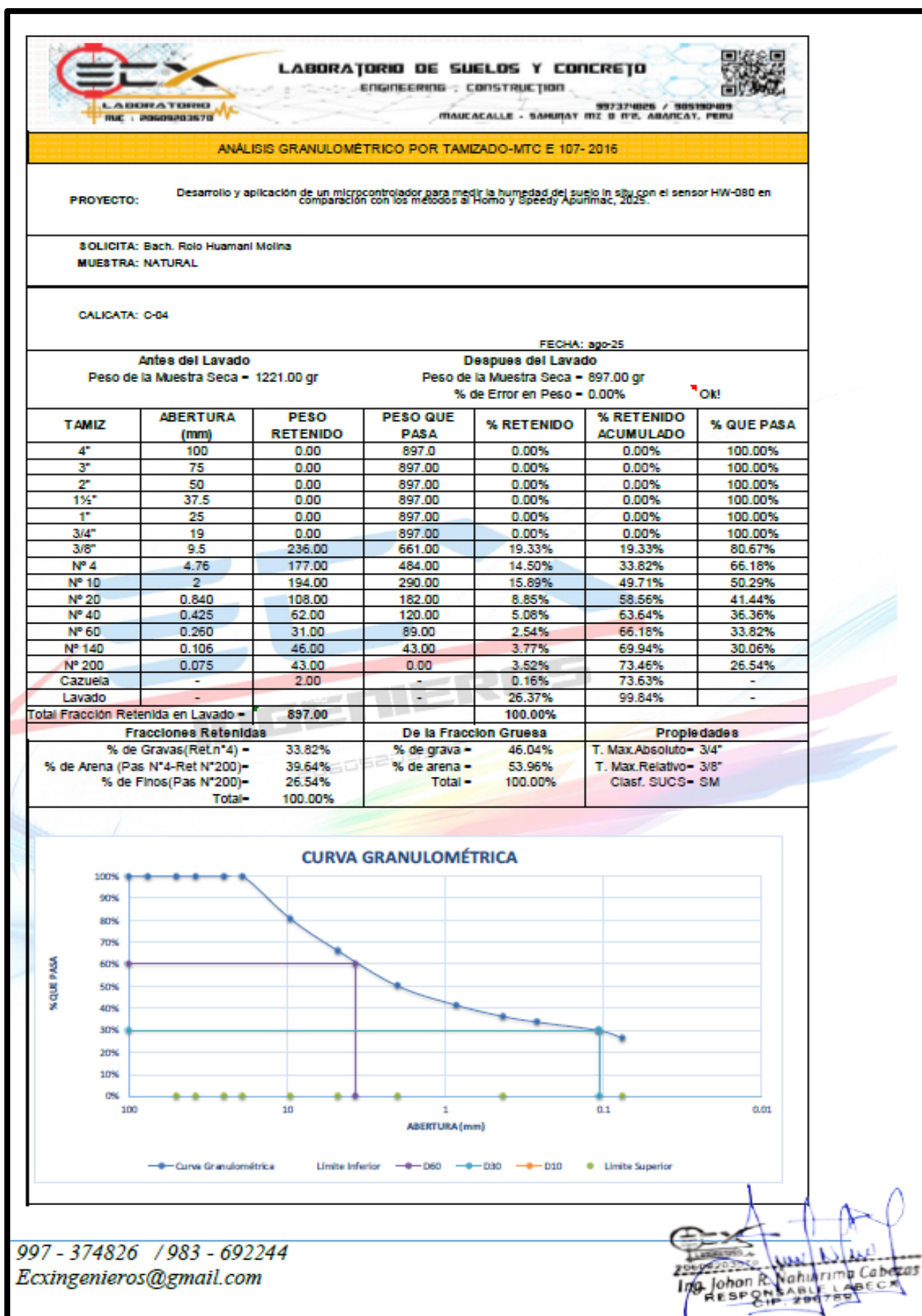
Ecxingenieros@gmail.com

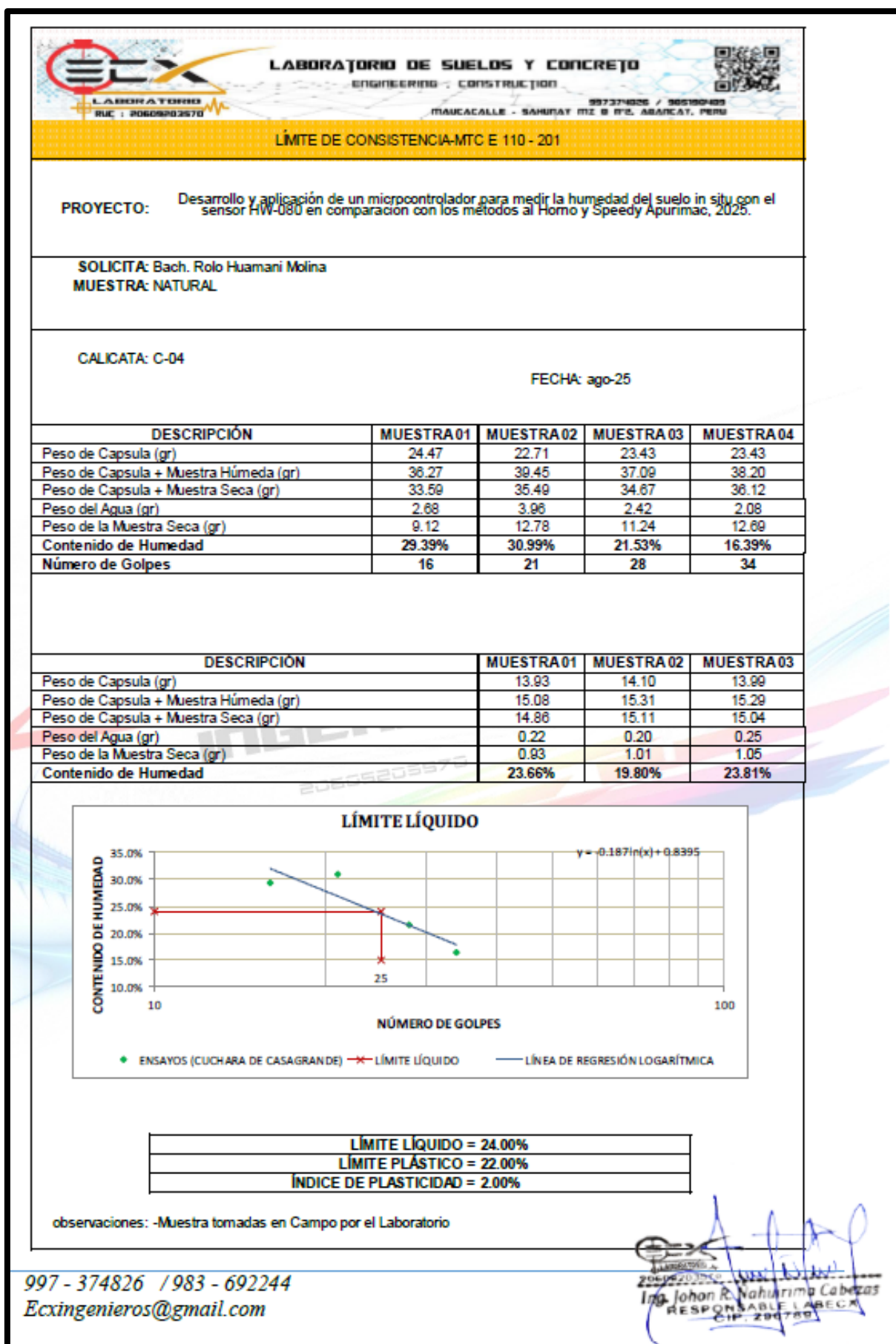


Ing. Johon R. Nahurima Cabezas
RESPONSABLE LABECC
CIP 290725

FUENTE: Elaboración propia

Figura 40 — Contenido de humedad de C-4





FUENTE: Elaboración propia

Figura 42 — Límite líquido de C-4



RESULTADOS DE LOS ENSAYOS DE CONTENIDO DE HUMEDAD (CALICATA C-04)

SENSOR	8%
ENSAYO SPEEDY	10.50%
HUMEDAD HORNO	9.81%

997 - 374826 / 983 - 692244
 Ecxingenieros@gmail.com

[Signature]
 Ing. Johan R. Nahurima Cabezas
 RESPONSABLE LABECC
 CIP-296755

FUENTE: Elaboración propia

Figura 43 — Resultados de C-4