

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELECTROMECAÁNICA



MAESTRÍA TERMINAL EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELECTROMECAÁNICA

TESIS DE MAESTRÍA TERMINAL

Presentado para la obtención del título de **MAGISTER SCIENTIARUM**

“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA RECOLECCIÓN
DE DATOS PARA UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMÁTICO

CASO: LABORATORIO DE RIEGO, FACULTAD DE
AGRONOMÍA, U.M.S.A.”

Autor: Ing. Alejandro Roger Saravia Quispe

Tutor: M. Sc. Ing. Alejandro Martin Mayori Machicao

LA PAZ – BOLIVIA

2024



**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERIA**



LA FACULTAD DE INGENIERIA DE LA UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS AUTORIZA EL USO DE LA INFORMACIÓN CONTENIDA EN ESTE DOCUMENTO SI LOS PROPÓSITOS SON ESTRICTAMENTE ACADÉMICOS.

LICENCIA DE USO

El usuario está autorizado a:

- a) Visualizar el documento mediante el uso de un ordenador o dispositivo móvil.
- b) Copiar, almacenar o imprimir si ha de ser de uso exclusivamente personal y privado.
- c) Copiar textualmente parte(s) de su contenido mencionando la fuente y/o haciendo la cita o referencia correspondiente en apego a las normas de redacción e investigación.

El usuario no puede publicar, distribuir o realizar emisión o exhibición alguna de este material, sin la autorización correspondiente.

TODOS LOS DERECHOS RESERVADOS. EL USO NO AUTORIZADO DE LOS CONTENIDOS PUBLICADOS EN ESTE SITIO DERIVARA EN EL INICIO DE ACCIONES LEGALES CONTEMPLADAS EN LA LEY DE DERECHOS DE AUTOR.

**“EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS PARA
UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMÁTICO
CASO: LABORATORIO DE RIEGO, FACULTAD DE AGRONOMÍA, U.M.S.A.”**

Por

Ing. Alejandro Roger Saravia Quispe

Revisado y presentado ante Tribunal de Grado Académico

APROBADO

M. Sc. Ing. Alejandro Martin Mayori Machicao

Asesor de Tesis de Maestría Terminal

**UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE INGENIERÍA
CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTROMECAÁNICA**

Agosto, 2024

RESUMEN

El presente trabajo de investigación trata sobre el estudio de la eficiencia de los sensores instalados en el sistema automático de riego del Laboratorio de Riego de la Facultad de Agronomía UMSA. Estudio enfocado en el análisis del comportamiento del sensor capacitivo, el cual tiene la finalidad de detectar y cuantificar los niveles de humedad de suelo, expresados generalmente en concentración volumétrica de agua o VWC, en condiciones de funcionamiento normal para determinar la calidad de lectura de los mismos, aclarando que estos sensores son bastante económicos, pudiendo adquirirse a un precio de 15 [Bs] la unidad, siendo este un motivo relevante para evaluar su funcionamiento, puesto que la finalidad de un sistema automático de riego es la de aprovechar adecuadamente el agua a partir de las lecturas que realice los mismos, siendo favorable si este puede ser instalado a un precio económico. Durante el presente trabajo se observa el proceso de calibración que conlleva dichos sensores, observación de comportamiento frente a 3 tipos de suelo y comparación de las lecturas obtenidas por los mismos frente a los obtenidos por método gravimétrico, realizando el análisis estadístico correspondiente mediante herramienta de software, los análisis llevados a cabo son: Análisis de regresión, Diagrama de Bland-Altman, prueba de estadístico de t y análisis de incertidumbre entre los más importantes. Todos los datos fueron recolectados en un ambiente controlado, aunque de igual forma se muestra la variación de las lecturas en función de los cambios de temperatura dentro del Laboratorio. Los resultados expuestos determinan la precisión que lo hace apto para determinadas situaciones, mismos que son expresados principalmente bajo enfoques dadas por las ecuaciones de calibración que, a su vez, tendrá un enfoque de forma individual (por sensor) y grupal (por tipo de suelo).

DEDICATORIA

A Dios.

A mis padres: Rolando y Martha,

A mis hermanos: Yesica, Rocio y Fernando.

A mis amigos y familiares.

A mi carrera, mi facultad y universidad.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme a la vida y permitirme culminar la primera etapa de mi formación profesional y que me permitirá llegar hasta donde Él lo disponga.

A mis padres por el valioso apoyo incondicional durante estos años de estudio; a mis hermanos y amigos por todas las experiencias compartidas y apoyo.

A los docentes, auxiliares, encargados de talleres y laboratorios de la Facultad de Ingeniería por sus conocimientos y experiencia de vida compartidos.

Al Dr. René Chipana por sus consejos y la confianza brindada al permitirme realizar el presente trabajo de investigación en el Laboratorio de Riego de la Facultad de Agronomía, Así mismo, agradecer a las autoridades de la misma que posibilitaron el desarrollo del presente trabajo.

A mi tutor M. Sc. Ing. Alejandro Mayori por su apoyo en la elaboración de esta tesis.

A mis tribunales: M.Sc.ing. Jaime Sanchez, M.Sc.Ing. Ciro Levy, y M.Sc.Ing. Febo Flores quienes apoyaron y contribuyeron a la concretización del presente trabajo mediante observaciones y consejos.

Terminando el posgrado me propongo llevar en alto el nombre de nuestra Universidad y país en todo momento y lugar.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS E ILUSTRACIONES	v
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
CAPÍTULO I.....	1
1. GENERALIDADES.....	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Planteamiento del problema de investigación.....	1
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo general.....	2
1.3.2. Objetivos específicos.....	2
1.4. Hipótesis de la experimentación.....	2
1.5. Justificación de la investigación.....	2
1.5.1. Justificación técnica.....	2
1.5.2. Justificación económica.....	3
1.5.3. Justificación social.....	3
1.6. Límites y alcances de la investigación.....	3
1.6.1. Límites.....	3
1.6.2. Alcances.....	3
CAPÍTULO II.....	4
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	4
2.1. Antecedentes de la investigación.....	4
2.1.1. Proyectos nacionales.....	4
2.1.2. Proyectos externos.....	4
2.2. Marco teórico.....	4
2.2.1. Humedad de suelo.....	5
2.2.1.1. Métodos de medición de humedad de suelo.....	5

2.2.1.2.	Calibración de sensores de humedad de suelo: método de calibración A.	7
2.3.	Textura del suelo.....	9
2.3.1.	Densidad aparente.	10
CAPÍTULO III		12
3.	DISEÑO EXPERIMENTAL.....	12
3.1.	Metodología de la investigación.....	12
3.1.1.	Definición operacional de las variables.....	12
3.1.1.1.	Variable independiente.....	12
3.1.1.2.	Variable dependiente.....	12
3.1.2.	Método de investigación.....	13
3.1.3.	Tipo de investigación.	13
3.1.4.	Instrumentos y medidas.....	13
3.1.4.1.	Materiales presentes en el sistema automático.....	13
3.1.4.2.	Instrumentos de medición.	14
3.1.4.3.	Materiales.....	15
3.1.4.4.	Medidas.....	16
3.1.5.	Diseño de investigación.....	17
CAPÍTULO IV		24
4.	EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS	24
4.1.	Medición y experimentación.....	24
4.1.1.	Calibración de sensores: Calibración A.	24
4.1.1.1.	Preparación de instrumentos.	24
4.1.1.2.	Preparación de suelo.	24
4.1.1.3.	Medición de humedad de suelo.....	26
4.1.1.4.	Saturación de muestra de suelo.....	27
4.1.1.5.	Cambio de suelo.....	28
4.1.1.6.	Secado de muestras.....	28

4.1.1.7.	Consideraciones adicionales.	29
4.1.2.	Datos del proceso de calibración.	30
4.1.3.	Obtención de ecuación de calibración.	32
4.1.3.1.	Curvas de calibración Suelo 1.	32
4.1.3.2.	Curvas de calibración Suelo 2.	37
4.1.3.3.	Curvas de calibración Suelo 3.	41
4.1.3.4.	Ecuaciones de calibración.	45
4.1.4.	Tiempo de respuesta de sensores.	46
4.1.5.	Datos del sistema en funcionamiento.	48
4.1.5.1.	Recolección de muestras para método gravimétrico.	49
4.1.5.2.	Lecturas del sistema.	54
4.2.	Tratamiento de datos.	61
4.2.1.	Análisis de regresión.	62
4.2.1.1.	Para cada sensor.	62
4.2.1.2.	Para tipo de suelo.	71
4.2.2.	Diagrama de Bland-Altman.	74
4.2.2.1.	Para cada sensor.	75
4.2.2.2.	Para cada tipo de Suelo.	92
4.2.3.	Prueba t.	95
4.2.3.1.	Para cada sensor.	96
4.2.3.2.	Por tipo de suelo.	102
4.2.4.	Estabilidad de las lecturas.	104
4.2.5.	Tiempo de respuesta de los sensores.	106
4.3.	Incertidumbre de las mediciones.	108
4.4.	Validación.	112
CAPÍTULO V	114
5.	RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN.	114
5.1.	Estabilidad de la lectura.	114

5.2. Tiempo de respuesta de los sensores.	114
5.3. Calidad de las lecturas.	114
CAPÍTULO VI.....	119
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	119
6.1. Conclusiones.....	119
6.2. Recomendaciones.	121
BIBLIOGRAFÍA/WEBGRAFÍA	122
ANEXOS.....	124
ANEXO A: ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE CALIBRACIÓN ENCONTRADAS.	125
ANEXO B: DATOS PARA EL DIAGRAMA DE BAND-ALTMAN	134
ANEXO C: PROGRAMAS UTILIZADOS.....	141
ANEXO D: PLANOS.....	145
ANEXO E: HOJA TÉCNICA	147

ÍNDICE DE FIGURAS E ILUSTRACIONES

Figura 2-1: Diagrama de dispersión VWC vs RAW y su ecuación de calibración.	9
Figura 2-2: Triángulo textural de Suelo	10
Figura 3-1: Muestras de suelo para macetas.	18
Figura 4-1: Sensores etiquetados.....	24
Figura 4-2: Contenedor de muestra de suelo para calibración en balanza.	25
Figura 4-3: Colocación de muestra de suelo.	25
Figura 4-4: Pesaje de muestra de suelo.	26
Figura 4-5: Rango de medición.	26
Figura 4-6: Colocación de sensor en suelo.	27
Figura 4-7: Pesaje de agua para saturación.	28
Figura 4-8: Mezcla manual de suelo con agua añadida.	28
Figura 4-9: Secado de muestras en horno del LAFASA.....	29
Figura 4-10: Curva de calibración 1 Sensor 1, Suelo 1.....	33
Figura 4-11: Curva de calibración 2 Sensor 1, Suelo 1.....	34
Figura 4-12: Curva de calibración 1 Sensor 2, Suelo 1.....	35
Figura 4-13: Curva de calibración 2 Sensor 2, Suelo 1.....	35
Figura 4-14: Curva de calibración 1 Sensor 3, Suelo 1.....	36
Figura 4-15: Curva de calibración 2 Sensor 3, Suelo 1.....	37
Figura 4-16: Curva de calibración 1 Sensor 4, Suelo 2.....	38
Figura 4-17: Curva de calibración 2 Sensor 4, Suelo 2.....	38
Figura 4-18: Curva de calibración 1 Sensor 5, Suelo 2.....	39
Figura 4-19: Curva de calibración 2 Sensor 5, Suelo 2.....	40
Figura 4-20: Gráfica de dispersión Sensor 6, Suelo 2.....	40
Figura 4-21: Curva de calibración 2 Sensor 6, Suelo 2.....	41
Figura 4-22: Curva de calibración 1 Sensor 7, Suelo 3.....	42
Figura 4-23: Curva de calibración 2 Sensor 7, Suelo 3.....	42
Figura 4-24: Curva de calibración 1 Sensor 8, Suelo 3.....	43
Figura 4-25: Curva de calibración 2 Sensor 8, Suelo 3.....	44
Figura 4-26: Curva de calibración 1 Sensor 9, Suelo 3.....	44
Figura 4-27: Curva de calibración 2 Sensor 9, Suelo 3.....	45
Figura 4-28: Lectura de tiempos de respuesta de los sensores.....	47
Figura 4-29: Disposición de macetas en el laboratorio.	48

Figura 4-30: Disposición del punto de goteo y sensor en la maceta.	48
Figura 4-31: Panel central del sistema automático de riego.....	49
Figura 4-32: Obtención de las masas de las muestras.....	50
Figura 4-33: Proceso de secado de las muestras de suelo de las macetas.....	50
Figura 4-34: Muestras de macetas secadas.	51
Figura 4-35: Memoria micro SD del sistema automático de Riego.....	55
Figura 4-36: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 1.	63
Figura 4-37: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 1.	63
Figura 4-38: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 2	64
Figura 4-39: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 2.	64
Figura 4-40: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 3	65
Figura 4-41: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 3	65
Figura 4-42: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 4	66
Figura 4-43: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 4	66
Figura 4-44: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 5	67
Figura 4-45: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 5.	67
Figura 4-46: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 6	68
Figura 4-47: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 6.	68
Figura 4-48: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 7	69
Figura 4-49: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 7	69
Figura 4-50: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 8	70
Figura 4-51: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 8	70
Figura 4-52: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 9	71
Figura 4-53: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 9	71
Figura 4-54: Análisis de regresión calibración 1: Suelo 1.	72
Figura 4-55: Análisis de regresión calibración 2: Suelo 1.	72
Figura 4-56: Análisis de regresión calibración 1: Suelo 2.	73
Figura 4-57: Análisis de regresión calibración 2: Suelo 2.	73
Figura 4-58: Análisis de regresión calibración 1: Suelo 3.	74
Figura 4-59: Análisis de regresión calibración 2: Suelo 3.	74
Figura 4-60: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 1, Sensor 1 (Ecuación de calibración).	76
Figura 4-61: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 1, Sensor 1 (Ecuación de calibración).	76

Figura 4-62: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 2, Sensor 2 (Ecuación de calibración).	78
Figura 4-63: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 2, Sensor 2 (Ecuación de calibración).	78
Figura 4-64: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 3, Sensor 3 (Ecuación de calibración).	80
Figura 4-65: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 1, Sensor 3 (Ecuación de calibración).	80
Figura 4-66: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 4, Sensor 4 (Ecuación de calibración).	82
Figura 4-67: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 1, Sensor 4 (Ecuación de calibración).	82
Figura 4-68: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 5, Sensor 5 (Ecuación de calibración).	84
Figura 4-69: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 5, Sensor 5 (Ecuación de calibración).	84
Figura 4-70: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 6, Sensor 6 (Ecuación de calibración).	86
Figura 4-71: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 6, Sensor 6 (Ecuación de calibración).	86
Figura 4-72: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 7, Sensor 7 (Ecuación de calibración).	88
Figura 4-73: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 7, Sensor 7 (Ecuación de calibración).	88
Figura 4-74: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 8, Sensor 8 (Ecuación de calibración).	90
Figura 4-75: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 8, Sensor 8 (Ecuación de calibración).	90
Figura 4-76: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 9, Sensor 9 (Ecuación de calibración).	92
Figura 4-77: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 1, Sensor 9 (Ecuación de calibración).	92
Figura 4-78: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 1 (Calibración 1).	93
Figura 4-79: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 1 (Calibración 2).	93

Figura 4-80: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 2 (Calibración 1).....	94
Figura 4-81: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 2 (Calibración 2).....	94
Figura 4-82: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 3 (Calibración 1).....	95
Figura 4-83: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 3 (Calibración 2).....	95
Figura 4-84: Variación de las lecturas de los sensores en función de la temperatura, día 1.	105
Figura 4-85: Variación de las lecturas de los sensores en función de la temperatura, día 2.	105
Figura 4-86: Variación de las lecturas de los sensores en función de la temperatura, día 3.	106
Figura 4-87: Diagrama caja y bigotes para tiempo de respuesta de los sensores; 1, 2 y 3.	107
Figura 4-88: Diagrama caja y bigotes para tiempo de respuesta de los sensores; 4, 5 y 6.	107
Figura 4-89: Diagrama caja y bigotes para tiempo de respuesta de los sensores: 7, 8 y 9.	108

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1: Densidad aparente según la textura.	11
Tabla 3-1: Variables independientes.	12
Tabla 3-2: Variables dependientes.	12
Tabla 3-3: Materiales instalados en el sistema de riego.	13
Tabla 3-4: Instrumentos para medición.	15
Tabla 3-5: Características de los suelos utilizados en el trabajo de investigación.	16
Tabla 3-6: Medidas principales para la curva de calibración.	16
Tabla 3-7: Medidas principales para el sistema en funcionamiento.	17
Tabla 3-8: Variables de medición para calibración.	18
Tabla 3-9: Volumen de saturación para cada tipo de suelo.	19
Tabla 3-10: Designación de Sensores en las macetas del laboratorio de riego.	20
Tabla 3-11: Variables de medición para el sistema en funcionamiento.	21
Tabla 3-12: Cantidad de muestras para la calibración y sistema en funcionamiento.	22
Tabla 4-1: Datos RAW de calibración 1.	30
Tabla 4-2: Datos RAW de calibración 2.	30
Tabla 4-3: Valores de VWC obtenidos por método gravimétrico Suelo 1.	31
Tabla 4-4: Valores de VWC obtenidos por método gravimétrico Suelo 2.	32
Tabla 4-5: Valores de VWC obtenidos por método gravimétrico Suelo 3.	32
Tabla 4-6: Datos de calibración 1 Sensor 1, Suelo 1.	33
Tabla 4-7: Datos de calibración 2 Sensor 1, Suelo 1.	33
Tabla 4-8: Datos de calibración 1 Sensor 2, Suelo 1.	34
Tabla 4-9: Datos de calibración 2 Sensor 2, Suelo 1.	35
Tabla 4-10: Datos de calibración 1 Sensor 3, Suelo 1.	36
Tabla 4-11: Datos de calibración 2 Sensor 3, Suelo 1.	36
Tabla 4-12: Datos de calibración Sensor 4, Suelo 2.	37
Tabla 4-13: Datos de calibración 2 Sensor 4, Suelo 2.	38
Tabla 4-14: Datos de calibración Sensor 5, Suelo 2.	39
Tabla 4-15: Datos de calibración 2 Sensor 5, Suelo 2.	39
Tabla 4-16: Datos de calibración Sensor 6, Suelo 2.	40
Tabla 4-17: Datos de calibración 2 Sensor 6, Suelo 2.	41
Tabla 4-18: Datos de calibración Sensor 7, Suelo 3.	41
Tabla 4-19: Datos de calibración 2 Sensor 7, Suelo 3.	42

Tabla 4-20: Datos de calibración 1 Sensor 8, Suelo 3.....	43
Tabla 4-21: Datos de calibración 2 Sensor 8, Suelo 3.....	43
Tabla 4-22: Datos de calibración 1 Sensor 9, Suelo 3.....	44
Tabla 4-23: Datos de calibración 2 Sensor 9, Suelo 3.....	45
Tabla 4-24: Ecuaciones de calibración, calibración 1	46
Tabla 4-25: Ecuaciones de calibración, calibración 2.....	46
Tabla 4-26: Tiempo de respuesta de los sensores.	47
Tabla 4-27: VWC por método gravimétrico, maceta 1.	51
Tabla 4-28: VWC por método gravimétrico, maceta 2.	52
Tabla 4-29: VWC por método gravimétrico, maceta 3.	52
Tabla 4-30: VWC por método gravimétrico, maceta 4.	52
Tabla 4-31: VWC por método gravimétrico, maceta 5.	53
Tabla 4-32: VWC por método gravimétrico, maceta 6.	53
Tabla 4-33: VWC por método gravimétrico, maceta 7.	53
Tabla 4-34: VWC por método gravimétrico, maceta 8.	54
Tabla 4-35: VWC por método gravimétrico, maceta 9.	54
Tabla 4-36: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 1 (Calibración 1).....	55
Tabla 4-37: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 2 (Calibración 1).....	56
Tabla 4-38: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 3 (Calibración 1).....	56
Tabla 4-39: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 4 (Calibración 1).....	56
Tabla 4-40: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 5 (Calibración 1).....	57
Tabla 4-41: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 6 (Calibración 1).....	57
Tabla 4-42: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 7 (Calibración 1).....	57
Tabla 4-43: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 8 (Calibración 1).....	58
Tabla 4-44: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 9 (Calibración 1).....	58
Tabla 4-45: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 1 (Calibración 2).....	58
Tabla 4-46: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 2 (Calibración 2).....	59
Tabla 4-47: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 3 (Calibración 2).....	59
Tabla 4-48: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 4 (Calibración 2).....	59
Tabla 4-49: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 5 (Calibración 2).....	60
Tabla 4-50: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 6 (Calibración 2).....	60
Tabla 4-51: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 7 (Calibración 2).....	60
Tabla 4-52: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 8 (Calibración 2).....	61
Tabla 4-53: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 9 (Calibración 2).....	61

Tabla 4-54: Valores promedios de los datos recolectados por el sistema (Calibración 1).	61
Tabla 4-55: Valores promedios de los datos recolectados por el sistema (Calibración 2).	62
Tabla 4-56: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 1.	75
Tabla 4-57: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 1.	75
Tabla 4-58: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 2.	77
Tabla 4-59: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 2.	77
Tabla 4-60: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 3.	79
Tabla 4-61: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 3.	79
Tabla 4-62: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 4.	81
Tabla 4-63: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 4.	81
Tabla 4-64: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 5.	83
Tabla 4-65: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 5.	83
Tabla 4-66: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 6.	85
Tabla 4-67: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 6.	85
Tabla 4-68: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 7.	87
Tabla 4-69: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 7.	87
Tabla 4-70: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 8.	89
Tabla 4-71: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 9.	91

Tabla 4-72: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 9.	91
Tabla 4-73: Prueba t para sensor 1 (Calibración 1).....	96
Tabla 4-74: Prueba t para sensor 1 (Calibración 2).....	96
Tabla 4-75: Prueba t para sensor 2 (Calibración 1).....	97
Tabla 4-76: Prueba t para sensor 2 (Calibración 2).....	97
Tabla 4-77: Prueba t para sensor 3 (Calibración 1).....	97
Tabla 4-78: Prueba t para sensor 3 (Calibración 2).....	98
Tabla 4-79: Prueba t para sensor 4 (Calibración 1).....	98
Tabla 4-80: Prueba t para sensor 4 (Calibración 2).....	98
Tabla 4-81: Prueba t para sensor 5 (Calibración 1).....	99
Tabla 4-82: Prueba t para sensor 5 (Calibración 2).....	99
Tabla 4-83: Prueba t para sensor 6 (Calibración 1).....	99
Tabla 4-84: Prueba t para sensor 6 (Calibración 2).....	100
Tabla 4-85: Prueba t para sensor 7 (Calibración 1).....	100
Tabla 4-86: Prueba t para sensor 7 (Calibración 2).....	101
Tabla 4-87: Prueba t para sensor 8 (Calibración 1).....	101
Tabla 4-88: Prueba t para sensor 8 (Calibración 2).....	101
Tabla 4-89: Prueba t para sensor 9 (Calibración 1).....	102
Tabla 4-90: Prueba t para sensor 9 (Calibración 2).....	102
Tabla 4-91: Prueba t para Suelo 1 (Calibración 1).....	102
Tabla 4-92: Prueba t para Suelo 1 (Calibración 2).....	103
Tabla 4-93: Prueba t para Suelo 2 (Calibración 1).....	103
Tabla 4-94: Prueba t para Suelo 2 (Calibración 2).....	103
Tabla 4-95: Prueba t para Suelo 3 (Calibración 1).....	104
Tabla 4-96: Prueba t para Suelo 3 (Calibración 2).....	104
Tabla 4-97: Tratamiento estadístico de los tiempos de respuesta de los sensores.	106
Tabla 4-98: Incertidumbre por variación de lecturas por cambio de temperatura dentro del Laboratorio.	108
Tabla 4-99: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 1 (Calibración 1).....	109
Tabla 4-100: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 2 (Calibración 1).....	109

Tabla 4-101: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 3 (Calibración 1).....	109
Tabla 4-102: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 1 (Calibración 2).....	110
Tabla 4-103: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 2 (Calibración 2).....	110
Tabla 4-104: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 3 (Calibración 2).....	111
Tabla 4-105: Análisis de incertidumbre de curvas de calibración.	111
Tabla 4-106: Incertidumbre total para cada sensor.	112
Tabla 5-1: Simbología para cuadro de resultados.	115
Tabla 5-2: Tabla resumen de resultados: Por sensores.....	116
Tabla 5-3: Tabla resumen de resultados: Por tipo de suelo.....	117
Tabla A 1: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 1 (Calibración 1)..	126
Tabla A 2: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 1, Suelo 1.	126
Tabla A 3: Estimación de VWC a partir de la ecuación hallada Sensor 2, Suelo 1.	126
Tabla A 4: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 2, Suelo 1 (Calibración 1).....	127
Tabla A 5: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 3, Suelo 1 (Calibración 1).....	127
Tabla A 6: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 3, Suelo 1.	127
Tabla A 7: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 4, Suelo 2 (Calibración 1).....	127
Tabla A 8: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 4.	128
Tabla A 9: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 5, Suelo 2 (Calibración 1).....	128
Tabla A 10: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 5, Suelo 2.	128
Tabla A 11: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 6, Suelo 2 (Calibración 1).....	129
Tabla A 12: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 6, Suelo 2.	129
Tabla A 13: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 7, Suelo 3 (Calibración 1).....	129
Tabla A 14: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 7, Suelo 3.	129

Tabla A 15: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 8, Suelo 3 (Calibración 1).....	130
Tabla A 16: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 8, Suelo 3.	130
Tabla A 17: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 9, Suelo 3 (Calibración 1).....	130
Tabla A 18: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 9, Suelo 3.	131
Tabla A 19: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 1 (Calibración 2)	131
Tabla A 20: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 2 (Calibración 2).	131
Tabla A 21: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 3 (Calibración 2).	131
Tabla A 22: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 4 (Calibración 2).	132
Tabla A 23: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 5 (Calibración 2).	132
Tabla A 24: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 6 (Calibración 2).	132
Tabla A 25: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 7 (Calibración 2).	133
Tabla A 26: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 8 (Calibración 2).	133
Tabla A 27: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 9 (Calibración 2).	133
Tabla A 28: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 1 (Ecuación de calibración).	135
Tabla A 29: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 2 (Ecuación de calibración).	135
Tabla A 30: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 3 (Ecuación de calibración).	136
Tabla A 31: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 1 (Función map).	136
Tabla A 32: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 2 (Función map).	137
Tabla A 33: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 3 (Función map).	138
Tabla A 34: Datos para diagrama de Bland-Altman para el suelo 1(Calibración 2).....	138
Tabla A 35: Datos para diagrama de Bland-Altman para el suelo 2 (Calibración 2).....	139

Tabla A 36: Datos para diagrama de Bland-Altman para el suelo 3 (Calibración 2)..... 139

ABREVIACIONES Y SIMBOLOGÍA

θ = Contenido volumétrico del agua en el suelo [cm^3/cm^3].

VWC=Contenido volumétrico de agua (por sus siglas en inglés).

VWC%=Contenido volumétrico de agua (por sus siglas en inglés) en porcentaje.

$VWC_{prom} \%$ =Contenido volumétrico de agua expresado en porcentaje (por sus siglas en inglés) promediado de varias lecturas obtenidas por la ecuación de calibración.

$VWC_{grav} \%$ =Contenido volumétrico de agua expresado en porcentaje (por sus siglas en inglés) Obtenido por método volumétrico en porcentaje.

$VWC_{dat} \%$ =Contenido volumétrico de agua expresado en porcentaje (por sus siglas en inglés) Datos instantáneos obtenido mediante la ecuación de calibración del sistema de riego automático en porcentaje.

RAW=Lectura del sensor de humedad del suelo.

LAFASA=Laboratorio de Suelos y Aguas de la Facultad de Agronomía.

m_{agua} = Masa de agua en la sub muestra de suelo [g].

m_{total} =Masa total de sub muestra de suelo [g].

$m_{suelo\ seco}$ = Masa de sub muestra de suelo seco [g].

v_{total} =Volumen total de sub muestra de suelo [cm^3].

v_{agua} = Volumen de agua en la sub muestra de suelo [cm^3].

ρ_{suelo} = Densidad aparente de suelo [g/cm^3].

$v_{saturación}$ = Volumen de agua para saturación [cm^3].

u =incertidumbre tipo A.

σ =Desviación estándar.

n =número de muestras.

u_{sensor} = Incertidumbre del sensor.

u_d = Incertidumbre del sensor en función de la variación de la lectura por día.

u_{m1} = Incertidumbre del sensor por lectura promedio.

u_{c1} = Incertidumbre del sensor por curva de calibración.

ADC = Conversión análogo a digital o digitalización de señal analógica (Analog to digital converter).

CAPÍTULO I

1. GENERALIDADES

1.1. Introducción.

La agricultura es uno de los pilares fundamentales de la sociedad, al igual que pilar fundamental en la economía boliviana, mismo por el cual se encuentra en constante evolución y búsqueda de nuevos métodos y tecnologías que permita una producción más sostenible, eficiente y rentable. En este contexto, los sistemas de riego automático han emergido como una herramienta esencial para optimizar el uso del agua, un recurso cada vez más escaso y valioso en el mundo.

La gestión adecuada del riego es crucial para el éxito de la agricultura moderna. Un riego inadecuado puede resultar en el desperdicio del agua aumentando costos operativos y una producción insatisfactoria. La automatización con placas de entrenamiento como Arduino, e interfaces como Ubidots (mismas que son accesibles para el público en general) han ofrecido soluciones prometedoras para mejorar la precisión y eficiencia. El laboratorio de riego de la Facultad de Agronomía de la U.M.S.A. cuenta con una instalación de riego automático, mediante el cual se realizan los procesos de forma controlada para las prácticas correspondientes.

El propósito del presente trabajo es evaluar la precisión y confiabilidad de la recolección de datos del sistema de riego automático perteneciente al Laboratorio de Riego, identificando cualquier deficiencia que pueda afectar a la hora de la toma de decisiones precisas.

1.2. Planteamiento del problema de investigación.

La gestión eficiente del riego es una prioridad en la agricultura moderna, no solo para maximizar la producción de cultivos, sino también para preservar un recurso crucial y escaso como el agua. En este contexto, los sistemas de riego automático han ganado importancia por su capacidad para optimizar el uso del agua y mejorar la precisión en la aplicación de riego. Sin embargo, su eficiencia en condiciones controladas de laboratorio, como las del Laboratorio de riego de la Facultad de Agronomía de la ciudad de La Paz, es un aspecto fundamental que merece evaluación y mejora continua.

El Laboratorio de riego de la Facultad de Agronomía de la ciudad de La Paz se presenta como un entorno controlado y favorable para la investigación en sistemas de riego automático. Sin embargo, para lograr una implementación exitosa de sistemas de riego automatizado en entornos agrícolas reales, es necesario abordar una serie de preguntas críticas:

¿Cómo se puede evaluar la eficacia de la recolección de datos del sistema actual de riego automático en el Laboratorio de riego de la Facultad de Agronomía U.M.S.A. en la ciudad de La Paz, en las condiciones controladas de laboratorio?

1.3. Objetivos.

1.3.1. Objetivo general.

- Evaluar la calidad de la recolección de datos en un sistema de riego automático del Laboratorio de riego de la Facultad de Agronomía U.M.S.A. métodos estadísticos.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Recolectar datos de humedad de suelo de las macetas mediante método gravimétrico.
- Comparar los datos recolectados por los sensores con respecto a los datos obtenidos por método gravimétrico.
- Identificar áreas de mejora del sistema para posteriores trabajos de investigación.

1.4. Hipótesis de la experimentación.

Es del tipo exploratoria, por lo tanto, no es necesaria la hipótesis.

1.5. Justificación de la investigación.

1.5.1. Justificación técnica.

El uso de sistemas de riego automático implica la aplicación de tecnología, que a menudo se basa en sensores y sistemas de control. Evaluar la eficacia de estos componentes tecnológicos es esencial para garantizar un funcionamiento óptimo, proporcionando datos técnicos y conclusiones respaldadas por la evidencia empírica.

1.5.2. Justificación económica.

Un sistema de riego automático eficiente, respaldado por una recolección de datos, ayuda a evitar pérdidas innecesarias de agua debido a un riego excesivo o insuficiente, contribuyendo a la economía circular. Además de fomentar la adopción de tecnologías sostenibles en la agricultura.

1.5.3. Justificación social.

La conclusión de la investigación contribuye directamente con la seguridad alimentaria y a la gestión responsable del agua, considerando que es un recurso natural indispensable y limitado.

1.6. Límites y alcances de la investigación.

1.6.1. Límites.

- Las pruebas serán realizadas en un ambiente cerrado, dentro del laboratorio de riego de la Facultad de Agronomía.
- Se analizará los sensores ya instalados en el sistema.

1.6.2. Alcances.

- El presente trabajo de investigación estimará la precisión de los sensores instalados en el Laboratorio de riego de la Facultad de Agronomía de la U.M.S.A. en la ciudad de La Paz.

CAPÍTULO II

2. FUNDAMENTO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación.

2.1.1. Proyectos nacionales.

- Universidad Mayor de San Andrés: Diseño e implementación de un sistema de riego automático para los cultivos de la facultad de agronomía U.M.S.A. en Cota Cota.
- Universidad Mayor de San Andrés: Optimización del sistema de riego usando tecnologías apropiadas (automatización).
- Universidad Pública de El Alto: Sistema de control de riego automatizado para un uso eficiente de agua.

2.1.2. Proyectos externos.

- Universidad Tecnológica del norte de Coahuila, México: Sistema de riego automatizado (Artículo).
- Revista Espacios: Sistema de riego automatizado con Arduino.
- Universidad Politécnica de Cataluña: Análisis y diseño del sistema de riego Capinota – Bolivia.
- Universidad Politécnica Salesiana, Ecuador: Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y controlado de forma inalámbrica para una finca ubicada en el sector popular de Balerio Estacio.

2.2. Marco teórico.

La necesidad de agua de riego determina la cantidad de agua que debe aportarse al cultivo para asegurar que recibe la totalidad de su necesidad hídrica o una fracción de estas. Cuando el riego es la única aportación de agua que dispone, la necesidad de agua será igual a la requerida por el cultivo, siendo mayor cuando existen pérdidas y menor cuando se puede satisfacer las necesidades críticas a partir de otros medios (lluvia).

Para la recolección de datos de humedad de suelo, primero debe comprenderse este concepto.

2.2.1. Humedad de suelo.

La humedad de suelo se refiere a la cantidad de agua que contiene el suelo, siendo esta una parte fundamental en los procesos biofísicos, o como dice (Hidalgo Ajata, 2020) “es un factor esencial en la biosfera”, considerando también la siguiente cita que dice “la humedad de suelo incide directamente en la infiltración, afectando el contenido de agua en el suelo y al escurrimiento superficial, generando un aspecto clave para los sistemas productivos agrícolas” (Berg et al.,2005), por lo cual, queda claro que la humedad de suelo influye de forma significativa en los procesos agrícolas.

Otro factor a considerarse es que la misma planta transpira, afectando la humedad de suelo, como se explica en la siguiente cita “las plantas transpiran grandes cantidades de agua como mecanismo para equilibrar su balance energético” (Villafálifa & Wyss, 2009, pág. 7). Por lo tanto, la misma planta afecta la humedad del suelo, “el suelo pierde agua por efecto de la transpiración, evaporación o absorción por las plantas” (Vásconez Cuzco, 2013), en consecuencia, el suelo pierde humedad, misma que requiere la planta.

¿Cómo puede ser medida la humedad de suelo?

“La humedad de suelo puede ser medida mediante técnicas *in situ*” (Hidalgo Ajata, 2020, pág. 3). Lo cual significa que la medición puede realizarse en el mismo terreno, pudiendo ser medido mediante sensores implantados al suelo.

Existen varios métodos para medir la humedad del suelo, entre los cuales uno de los más utilizados es el método gravimétrico el cual no es considerado como una técnica “*in situ*”, por otra parte, existen sensores que facilitan la medición *in situ*, como los sensores instalados en el Laboratorio de riego, los cuales funcionan bajo el principio de inducción electromagnética. Por lo mencionado, a continuación, se muestra algunos aspectos de estos tipos de medición de humedad de suelo.

2.2.1.1. Métodos de medición de humedad de suelo.

2.2.1.1.1. Método gravimétrico.

“El método gravimétrico es el método más utilizado de todos los métodos para medir el contenido de agua en el suelo” (Eciso, 2007). Consiste en secar una muestra de suelo en un

horno para luego evaluar su pérdida de peso debido a la evaporación del agua contenía el suelo. La información obtenida, se basa principalmente en la masa, dando datos de la masa total del suelo húmedo y la masa restante del suelo seco “A partir de estas 2 masas se puede hallar la masa de agua en la muestra del suelo” (Hidalgo Ajata, 2020, pág. 4) lo cual da como resultado la siguiente ecuación

$$m_{agua} = m_{total} - m_{suelo\ seco} \text{ Ecuación 2-1}$$

Donde:

m_{agua} : Masa de agua en la muestra de suelo [g]

m_{total} : Masa total del suelo [g]

$m_{suelo\ seco}$: Masa de suelo seco [g]

Sin embargo, es necesario aclarar que la humedad del suelo se expresa como una relación de volúmenes, por lo tanto, “considerando que la densidad del agua se mantiene constante ($\rho_{agua} = 1 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$) podemos considerar que la masa del agua (m_{agua}) es igual al volumen del agua (V_{agua})” (Hidalgo Ajata, 2020, pág. 4), por lo tanto, el contenido volumétrico del agua puede ser expresada de la siguiente manera:

$$\theta = \frac{V_{agua}}{V_{total}} \text{ Ecuación 2-2}$$

Donde:

θ : Contenido volumétrico del agua en el suelo [cm^3/cm^3].

V_{agua} : Volumen de agua en el suelo [cm^3].

V_{total} : Volumen total del suelo [cm^3].

Mediante esta expresión, puede expresarse el contenido volumétrico del agua o VWC por sus siglas en inglés.

2.2.1.1.2. Método basado en inducción electromagnética.

Dicho método “in situ” ha sido aplicado ampliamente en la agricultura “debido a que son poco destructivos, rápidos y económicos” (Stadler et al.,2015).

El método de inducción electromagnética aprovecha una de las propiedades únicas del agua, el cual es que el agua contiene un momento dipolar permanente. “Es por eso que el agua tiene una constante dieléctrica o permitividad relativa ϵ_r de ≈ 80 ” (Hidalgo Ajata, 2020, pág. 6).

Entonces, la variación de la humedad modifica la permitividad relativa del suelo, esta variación puede estimarse en contenido volumétrico del agua en el suelo [m^3/m^3].

“Sin embargo, la ϵ_r estimada no está disponible para el usuario a través de registradores de datos o lectores” (Adla, y otros, 2020, pág. 4). Lo cual da como resultado una lectura de valores de voltaje a valores enteros (analógicos a digitales). Por lo anterior, se requiere que el sensor sea calibrado antes de ponerlo a trabajar.

Los métodos de calibración son variados, para el presente trabajo de investigación se optará por la calibración A, considerando que “es un método muy recomendado y con buenos resultados para la calibración de sensores capacitivos es el método de calibración A” (METER Group, 2020).

2.2.1.2. Calibración de sensores de humedad de suelo: método de calibración A.

“De acuerdo a METER group (2020), fabricante estadounidense de sensores de humedad de suelo, el método de calibración A es el más recomendado para obtener una mayor precisión en la medición de la humedad de suelo” (Hidalgo Ajata, 2020, pág. 26). El método de calibración A, requiere realizar los siguientes 5 pasos

2.2.1.2.1. Paso 1: Instrumentos y equipos necesarios.

En este primer paso, se debe considerar lo siguiente:

- Una pala y un contenedor de suelo a granel.
- Sensor de humedad de suelo y un sistema de adquisición de datos (El sensor de humedad de suelo será el sensor que desea calibrarse).
- Una báscula.
- Calcular el volumen de suelo.

- Contenedores de secado de suelo (de ser necesario, debe ser un contenedor por tipo de suelo).
- Un horno de secado.

2.2.1.2.2. Paso 2: Recolección de muestras.

Para la recolección de muestras, se debe considerar lo siguiente:

- Recoger aproximadamente 4 litros de suelo.
- Asegurarse de que el suelo tenga dimensiones de profundidad suficientes para el sensor de humedad de suelo.
- Medir la densidad aparente (calcular la densidad teniendo como dato el volumen de la muestra y pesando la porción de suelo de muestra).

2.2.1.2.3. Paso 3: Preparación del suelo.

Para la preparación del suelo, se debe considerar lo siguiente:

- Secar el suelo al aire.
- Retirar objetos grandes del suelo.

2.2.1.2.4. Paso 4: Proceso de calibración.

Para la calibración, se debe considerar lo siguiente:

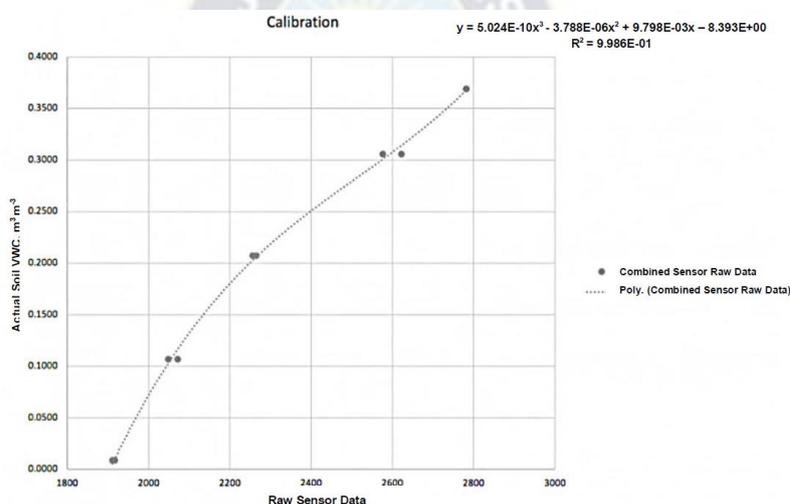
- Empacar el suelo en el contenedor de calibración, manteniendo la densidad aparente.
- Tomar una muestra volumétrica de suelo inicial.
- Pesar el contenedor de calibración antes de insertar el sensor de humedad.
- Insertar el sensor de humedad de suelo.
- El sensor de humedad de suelo debe estar rodeado de tierra.
- Tomar lectura del sensor de humedad de suelo.
- Mojar el suelo de calibración (agregar 1 mililitro de agua por cada 10 mililitros de volumen de suelo y mezclar la tierra con las manos para que quede homogénea).
- Repetir los mismos pasos hasta que el suelo se acerque a la saturación (generalmente se produce de 4 a 6 puntos de calibración).
- Secar la muestra volumétrica inicial del suelo.
- Pesar el suelo seco.

2.2.1.2.5. Paso 5: Obtención del modelo matemático.

“El modelo matemático o ecuación de calibración es el resultado del proceso de calibración de los sensores de humedad de suelo” (Hidalgo Ajata, 2020, pág. 31).

Para ello se necesitará recolectar datos de la lectura del sensor de humedad del suelo (RAW por sus siglas en inglés), el cual en el modelo matemático vendría representando el eje X, a la par de los datos de humedad de suelo se debe anotar el contenido volumétrico del agua o VWC (por sus siglas en inglés, el contenido volumétrico de agua se basa en la relación de volumen de agua con respecto al volumen de suelo).

Figura 2-1: Diagrama de dispersión VWC vs RAW y su ecuación de calibración.



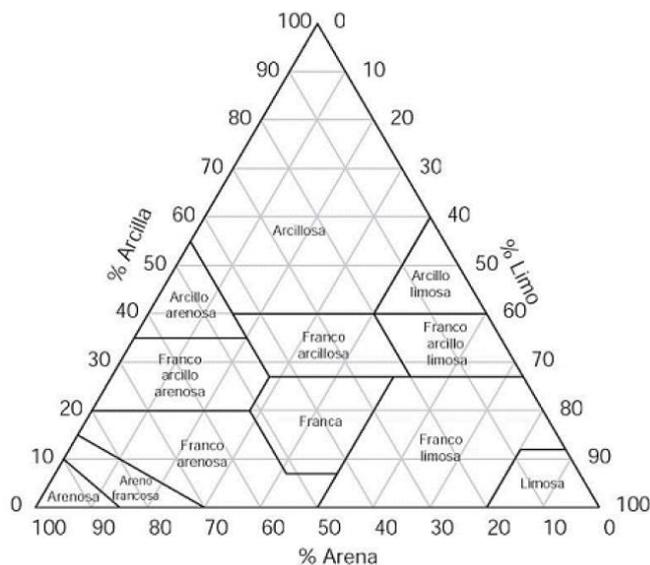
Fuente: (Hidalgo Ajata, 2020, pág. 32).

Posterior a obtener la ecuación de calibración, se procederá a programarlos en la placa de control (Arduino) para obtener los datos de los sensores de forma continua.

2.3. Textura del suelo.

El suelo es un factor importante, ya que, dependiendo del tipo, este permitirá mayor o menor concentración de agua debido a la porosidad. “Los espacios no ocupados por la fase sólida, constituyen los poros del suelo (porosidad), ocupados por aire y agua” (Lopez Mamani, 2020, pág. 49). Esto ocurre debido a la relación directa entre el tamaño y la forma de las partículas sólidas. “Un suelo está compuesto por partículas, cuya clasificación por tamaño se divide principalmente en 3: arcilla, arena y limo” (Hidalgo Ajata, 2020, pág. 37)

Figura 2-2: Triángulo textural de Suelo



Fuente: USDA.

En la anterior **Figura 2-2**, se muestra la clasificación de los tipos de suelo.

La densidad aparente del suelo varía según el tipo de suelo y, por ende, afecta la cantidad de agua que puede retener. A continuación, se explicará este concepto.

2.3.1. Densidad aparente.

“La densidad aparente es un indicador de las características importantes del suelo, tales como la porosidad, grado de aireación y capacidad de drenaje” (Hidalgo Ajata, 2020, pág. 39) por lo cual es una propiedad importante que debe considerarse al momento de efectuar el riego “se denomina densidad aparente al resultado de dividir la masa de suelo seco por el volumen del mismo” (Lopez Mamani, 2020, pág. 49). Por lo tanto, dependiendo de la textura, esta densidad aparente puede variar, a continuación, se muestra en la **Tabla 2-1** lo mencionado.

Tabla 2-1: Densidad aparente según la textura.

Textura	Densidad aparente (g/cm ³)
Arenas	1.6 a 1.7
Franco	1.3 a 1.4
Arcillas	1.0 a 1.2
Suelos orgánicos	0.7 a 1.0

Fuente: (Castillo Cerna, 2005, pág. 14).

Mediante dicha densidad aparente, se puede determinar el volumen de la muestra.



CAPÍTULO III

3. DISEÑO EXPERIMENTAL.

3.1. Metodología de la investigación.

3.1.1. Definición operacional de las variables.

3.1.1.1. Variable independiente.

Tabla 3-1: Variables independientes.

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional
Método de medición.	La medición de la humedad del suelo se lleva a cabo mediante diferentes enfoques, siendo dos de ellos el método gravimétrico y el método por inducción electromagnética.	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Método de medición basado en inducción electromagnética</i> (ver acápite 2.2.1.1.2.): Los sensores instalados utilizan este método para detectar y registrar cambios en la permitividad relativa del suelo, generando una señal analógica en voltaje. - <i>Método gravimétrico</i> (ver acápite 2.2.1.1.1.): se basa en la obtención de la humedad del suelo mediante relación directa del volumen de agua presente en una muestra de suelo con respecto al volumen total de la muestra. Este método se utiliza como medida de control.

Fuente: Elaboración propia.

3.1.1.2. Variable dependiente.

Tabla 3-2: Variables dependientes.

Variable	Definición Conceptual	Definición operacional
Humedad de suelo (macetas).	Cantidad de agua contenida en la tierra que ocupa un espacio dentro de la maceta.	<ul style="list-style-type: none"> - Datos analógicos obtenidos por los sensores y convertidos a la expresión de contenido volumétrico de agua, mediante la ecuación de calibración programados en la placa Arduino. - Medición indirecta mediante método gravimétrico, obteniendo de dato el volumen de agua de una muestra y el volumen total de la muestra. $\theta = \frac{V_{agua\ en\ la\ muestra}}{V_{total\ de\ muestra}}$ $VWC_{grav}\% = \theta * 100\%$

Fuente: Elaboración propia.

3.1.2. Método de investigación.

Se empleó la metodología cuantitativa.

3.1.3. Tipo de investigación.

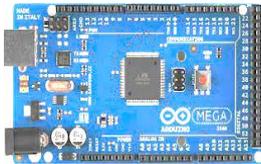
El trabajo de investigación es: **Cuantitativo y cuasi experimental.**

3.1.4. Instrumentos y medidas.

3.1.4.1. Materiales presentes en el sistema automático.

A continuación, se menciona los materiales presentes en el sistema automático de riego, los cuales permiten la recolección de datos durante el experimento:

Tabla 3-3: Materiales instalados en el sistema de riego.

Sistema de control					
N°	Material	Cantidad	Función	Características	
1	Arduino MEGA 2560	1	Unidad central de procesamiento, donde se recibe los datos provenientes de los sensores e interactúa con otros módulos.	Voltaje de alimentación: 5-12 [V] Cantidad de entradas analógicas: 16 Resolución de entradas analógicas: 10 bits	
2	Sensor capacitivo V1.2	9	Detectar los niveles de humedad de suelo	Voltaje de alimentación: 3,3 – 5[V] Voltaje de señal de salida: 0 a 5 [V] Vida útil: 3 años	
3	Módulo RTC DS3231	1	Proporcionar datos de fecha y hora sin la necesidad de que el microcontrolador esté energizado	Voltaje de alimentación: 3,3 [V] a 5[V] Exactitud de reloj: 2 ppm La batería puede mantener al RTC funcionando 10 años	
4	Módulo lector de memoria micro SD	1	Permite acceder y escribir archivos en la memoria micro SD, pudiendo guardar datos en la misma	Voltaje de alimentación: 3,3 [V] a 5[V]; Interfaz SPI; Compatible con tarjetas micro SD y micro SDHC	

5	Memoria micro SD	1	Permite guardar los datos recolectados por el sistema de riego automático en un archivo legible por cualquier sistema operativo	Capacidad de 16 Gb Marca Samsung	
6	Sensor DHT22	1	Permite detectar y cuantificar los cambios de temperatura ambiente dentro del Laboratorio	Voltaje de operación: 3[V]-6[V] DC Rango de medición de temperatura: -40 [°C] a 80 [°C]	
7	Banco de relé 4 canales	1	Permite accionar dispositivos de potencia como ser las bombas y válvulas de apertura.	4 Canales independientes protegidos por optoacopladores; Voltaje de bobina de relé 5[V]; Led indicador para cada canal; Terminales de entrada de señal digital	

Sistema de riego

N°	Material	Cantidad	Función	Características	
1	Bomba de agua 12 [V]	1	Succión de agua para el riego	Voltaje de alimentación: 12 [V]	
2	Cinta de goteo	2 metros	Distribuir el agua en puntos localizados para riego		
3	Manguera	1	Permite el paso del agua desde su depósito hasta la cinta de goteo		
4	Maceta	9	Almacenamiento de porción de tierra		

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4.2. Instrumentos de medición.

A continuación, se describen los siguientes instrumentos que permiten realizar la recolección de muestra y la obtención de la humedad de suelo por método gravimétrico.

Tabla 3-4: Instrumentos para medición.

N°	Material	Cantidad	Función	Características	
1	Báscula digital de capacidad de 10[Kg]	1	Obtener la masa de grandes muestras	Capacidad de 10 [Kg]	
	Balanza digital de precisión	1	Obtener la masa de pequeñas sub muestras, antes y después de su secado en el horno	Resolución de 2 decimales Capacidad 10 [Kg]	
2	Contenedor de secado de muestra de suelo	72	Trasladar las sub muestras al horno de secado		
3	Contenedor de muestra de suelo para calibración	1	Contener los tipos de suelos para muestras de suelo para obtener las curvas de calibración	Capacidad de 2 [L]	
4	Horno de secado	1	Retirar el contenido de agua de las muestras.	Rango de temperatura de 30[°C] a 250 [°C]	
5	Pala pequeña de plástico	1	Recolectar la muestra y sub muestra de suelo.		

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4.3. Materiales.

Para el desarrollo de la investigación, se trabajó con 3 tipos de suelos, con el fin de observar la variabilidad de la curva de calibración en cada uno de los mismos, las características de cada tipo de suelo se muestran a continuación.

Tabla 3-5: Características de los suelos utilizados en el trabajo de investigación.

N°	Material	Función	Características	
1	Suelo arcilloso	Suelo de prueba para estudio de sensores	Densidad aparente: 1,23 [g/cm^3]	
2	Suelo franco	Suelo de prueba para estudio de sensores	Densidad aparente: 1,4 [g/cm^3]	
3	Suelo arenoso	Suelo de prueba para estudio de sensores	Densidad aparente: 1,7 [g/cm^3]	

Fuente: Elaboración propia.

3.1.4.4. Medidas.

Las medidas principales a considerarse se muestran a continuación.

Para la curva de calibración.

Tabla 3-6: Medidas principales para la curva de calibración.

N°	Medidas	Descripción	Unidades
1	VWC_{grav}	Humedad de suelo obtenido por método gravimétrico	%
2	RAW	Lecturas analógicas registradas por los sensores	

Fuente: Elaboración propia.

Para el sistema en funcionamiento.

Tabla 3-7: Medidas principales para el sistema en funcionamiento.

N°	Medidas	Descripción	Unidades
1	VWC_{grav}	Humedad de suelo obtenido por método gravimétrico	%
2	T_{amb}	Temperatura ambiente del Laboratorio	[°C]
3	VWC_{promc1}	Humedad de suelo promedio obtenido por los sensores del sistema, mediante ecuación de calibración 1	%
4	VWC_{promc2}	Humedad de suelo obtenido por los sensores del sistema, mediante ecuación de calibración 2	%

Fuente: Elaboración propia.

3.1.5. Diseño de investigación.

El lugar de la investigación es en el Laboratorio de Riego de la Facultad de Agronomía de la U.M.S.A.

Ubicación del lugar del ensayo:

Latitud: -16.505550997528285, Longitud: -68.1326815.

Los materiales e instrumentos utilizados son proporcionados por el mismo laboratorio, sin embargo, se adquirió materiales adicionales para facilitar la recolección de datos.

El procedimiento de experimentación es:

Paso 1, Preparación del sector de prueba

Para la preparación del sector de prueba, se tomó en cuenta los siguientes detalles:

- Se realizó un reordenamiento del laboratorio de riego, debido a que el sistema de riego automático se encontraba en desuso.
- Se añadió una maceta, teniendo un total de 9 macetas, esto con la finalidad de recolectar mayor cantidad de muestras.

Se recolectó 3 muestras de suelo, las cuales son: Suelo Arcilloso, Suelo Arenoso y Suelo Franco.

Figura 3-1: Muestras de suelo para macetas.



Fuente: Elaboración propia.

Paso 2, Fase de calibración (pre experimento):

Se llevó a cabo la calibración A, siguiendo los pasos que se especifican en el acápite 2.2.1.2., con el fin de obtener la ecuación de calibración para que el sistema recopile datos de forma continua.

Para ello, las variables a considerarse son las siguientes:

Tabla 3-8: Variables de medición para calibración.

N°	Variable	Símbolo	Unidad
1	Masa de sub muestra total	m_{total}	[g]
2	Masa de sub muestra seca	$m_{suelo\ seco}$	[g]
3	Volumen de sub muestra total	v_{total}	
4	Volumen de agua para saturación	$v_{saturación}$	[cm^3]
5	Volumen de agua presente en sub muestra	v_{agua}	[cm^3]
6	Lecturas analógicas de sensores, resolución de 10 bits	RAW	
7	Relación volumétrica entre cantidad de agua presente en una muestra de suelo y muestra de suelo total o humedad de suelo	θ	$\left[\frac{cm^3}{cm^3}\right]$
8	Humedad de suelo por método gravimétrico en porcentaje	$VWC_{grav\%}$	%

Fuente: Elaboración propia.

Cuya variable principal $VWC_{grav\%}$, se obtiene a partir de la siguiente ecuación:

$$VWC_{grav} \% = \frac{v_{agua}}{m_{total} / \rho_{suelo}} 100\% \text{ Ecuación 3-1}$$

Para el agua de saturación, se sigue las siguientes consideraciones:

Tabla 3-9: Volumen de saturación para cada tipo de suelo

Tipo de suelo	Volumen de agua de saturación para calibración [ml]	Número de saturaciones para curva
Arenoso	40	4
Franco	35	4
Arcilloso	29	4

Fuente: Elaboración propia.

Se optó por realizar 2 calibraciones, considerando los siguientes aspectos:

Calibración 1:

- Todos los sensores se conectaron a un solo pin analógico para obtener las lecturas de calibración.
- Se calibraron cada 3 sensores con un tipo de suelo en un solo contenedor de calibración.
- Luego de obtener los datos de calibración, se asignó cada sensor a los pines analógicos del 0 al 8, pines desde los cuales comenzaron a recolectar datos del sistema en funcionamiento.

Calibración 2:

- Cada sensor se conectó a un pin analógico correspondiente del 0 al 8.
- Se calibraron cada 3 sensores con un tipo de suelo, mediante un contenedor de calibración asignado a cada sensor, que en este caso vendría siendo la misma maceta donde se realizó la recolección de datos.
- La asignación del pin fue la misma tanto en la calibración como durante el funcionamiento del sistema.

La cantidad de muestras necesarias para las curvas de calibración, se basó en lo expuesto del acápite 2.2.1.2.4. el cual sugiere entre 4 a 6 muestras, por lo cual se tomó como base 5 muestras, teniendo un total de 15 muestras para la calibración 1, y 45 muestras para la calibración 2, como se expresa en la Tabla 3-10.

Obtenidos los pares de datos RAW y VWC por método gravimétrico, se obtuvo las curvas de calibración al igual que su ecuación, mismas que fueron incluidos en la programación en la placa Arduino Mega.

Paso 3, Recopilación de datos del sistema en funcionamiento.

Luego de obtenerse las curvas de calibración, se puso en marcha el sistema, bajo las siguientes consideraciones:

- Se colocó un tipo de suelo para cada 3 macetas.
- Se colocó un sensor a cada maceta.
- Los datos recopilados se guardaron en un archivo Excel de una memoria micro SD.
- Los datos recopilados se guardaron con datos de la hora de su recolección.
- La recolección de muestras se lo realizó en un intervalo de 20 minutos (con excepción de las 2 primeras muestras).
- El sistema tuvo un tiempo de bombeo de 5 minutos, luego del cual se apagó la misma durante 15 minutos, de los cuales se esperó 10 minutos para la extracción de la muestra.
- Se anotó la hora a la cual se extrajo la muestra, para la posterior revisión en el archivo Excel de la memoria micro SD.
- Se registró los valores de temperatura ambiente para observar la variación de las lecturas de los sensores en diferentes temperaturas del día, considerando solo valores enteros de temperatura.

La disposición de sensores, suelos y macetas se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 3-10: Designación de Sensores en las macetas del laboratorio de riego

Suelo	Tipo de suelo	Nº Maceta	Nº de sensor
		1	1
1	Arcilloso	2	2
		3	3
		4	4
		5	5
2	Franco	6	6
		7	7
		8	8
3	Arenoso	9	9

Fuente: Elaboración propia.

A partir de este punto, el número de suelo, sensor o maceta que se cite en el resto del documento, serán referenciados a la Tabla 3-10.

Para la recopilación de datos, se tomará en cuenta las siguiente variables

Tabla 3-11: Variables de medición para el sistema en funcionamiento.

	Nº	Variable	Símbolo	Unidad
Datos obtenidos mediante instrumentos de medición o mediante ecuación SD	1	VWC estimada por ecuación de calibración 1 en porcentaje	$VWC_{dat}\%$	%
	2	VWC estimada por ecuación de calibración 2 en porcentaje	$VWC_{dat}\%$	%
	3	Masa de sub muestra total antes del secado	m_{total}	[g]
	4	Masa de sub muestra seca	m_{seco}	[g]
	5	Volumen de sub muestra total antes del secado	v_{total}	[cm^3]
	5	Volumen de agua presente en sub muestra	v_{agua}	[cm^3]
	6	Humedad de suelo por método gravimétrico	$VWC_{grav}\%$	%

Fuente: Elaboración propia.

La cantidad de muestras a recolectarse, se basa en lo indicado en el acápite 2.2.1.2.4. estableciendo 6 muestras por macetas. Aunque en el mismo acápite hace más énfasis en la curva de calibración, se tomó esta referencia para establecer los suficientes datos para la comparación de resultados, puesto que esa cantidad sugerida es con el fin de que la característica invasiva del método gravimétrico no sea significativa.

Dicho lo anterior la cantidad de muestras tomadas durante la investigación se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 3-12: Cantidad de muestras para la calibración y sistema en funcionamiento.

Calibración 1		Calibración 2			Sistema en funcionamiento		
Suelo	Cantidad de muestras	Suelo	Maceta	Cantidad de muestras	Suelo	Maceta	Cantidad de muestras
			1	5		1	6
1	5	1	2	5	1	2	6
			3	5		3	6
			4	5		4	6
2	5	2	5	5	2	5	6
			6	5		6	6
			7	5		7	6
3	5	3	8	5	3	8	6
			9	5		9	6
Cantidad total de muestras	15	Cantidad total de muestras		45	Cantidad total de muestras		54

Fuente: Elaboración propia.

Paso 4, Análisis y tratamiento de datos mediante software:

Los datos recolectados se analizaron mediante herramienta Excel.

Para el tratamiento de datos se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

Datos registrados del sistema automático:

- Debido que los valores registrados en el sistema automático de riego tienen una variación, se tomó 5 datos para obtener un promedio el cual es comparado con los valores obtenidos por método gravimétrico. Posteriormente se consideraron dichos datos para la incertidumbre.
- Se tomó en cuenta los datos registrados 1 minuto antes del momento de la extracción de muestra del suelo.
- Se tomó en cuenta los datos de temperatura ambiente en valores enteros del Laboratorio.

Considerando lo anterior, se realizaron los siguientes análisis:

Variación de las lecturas en función de la temperatura:

- Se tomó en cuenta el promedio de las lecturas de los sensores entre los rangos donde la temperatura ambiente permaneció estable.

- Se observó mediante un gráfico la variación de las lecturas en función de los cambios de temperatura que se susciten en un día, estableciendo 3 días de observación, durante el cual no se activó la bomba.

Comparación de valores obtenidos mediante sensores y por método gravimétrico

- Se realizó un análisis de regresión para observar la correlación de los valores obtenidos por método gravimétrico frente a los registrados por el sistema automático de riego.
- Se realizó un diagrama de Bland-Altman para los valores obtenidos por el método gravimétrico y por la ecuación de calibración del sensor para cada sensor y tipo de suelo para verificar la concordancia entre los 2 métodos de medición e identificación de discrepancias.
- Se realizó la prueba de estadístico t para las lecturas obtenidas por método gravimétrico y por los sensores para determinar diferencias significativas entre los métodos.
- Se realizó el análisis de incertidumbre para los sensores para proporcionar una cuantificación de la precisión y la fiabilidad de los resultados obtenidos.

Tiempo de respuesta:

Para proporcionar información sobre el tiempo de reacción del sensor ante cambios del entorno físico el cual se desea medir.

- Se obtuvo las desviaciones estándar de los tiempos de respuesta para cada sensor.
- Se obtuvo los promedios y la medias para los tiempos de respuesta para cada sensor.
- Se obtuvo los diagramas de cajas y bigotes.

CAPÍTULO IV

4. EVALUACIÓN Y TRATAMIENTO DE DATOS

4.1. Medición y experimentación.

4.1.1. Calibración de sensores: Calibración A.

Para la calibración de los sensores, se toma en cuenta 3 tipos de suelos, y para cada uno de estos, se calibran 3 sensores designados como se muestra en la Tabla 3-10. Para ello se realizó el siguiente procedimiento.

4.1.1.1. Preparación de instrumentos.

Para la preparación de instrumentos, se realizó los siguientes pasos:

- a) Se etiquetó cada sensor con un número específico con el fin de recolectar datos de manera segura y cumplir con la designación especificada en la Tabla 3-7.

Figura 4-1: Sensores etiquetados.



Fuente: Elaboración propia.

- b) Se dispuso de una balanza, un recipiente para la adición de agua, un contenedor para la muestra de suelo y contenedores metálicos para las sub muestras de suelo.
- c) Se desarrolló un programa en la IDE de Arduino para obtener lecturas a través de los puertos analógicos.

Luego de la preparación de los instrumentos necesarios para la calibración, se procedió con la preparación del suelo.

4.1.1.2. Preparación de suelo.

En la preparación de suelo, se siguieron los siguientes pasos:

- a) Se colocó un contenedor de la muestra de calibración (inicialmente vacío) en una balanza y se estableció el punto 0 (tara).

Figura 4-2: Contenedor de muestra de suelo para calibración en balanza.



Fuente: Elaboración propia.

- b) Se llenó el contenedor hasta que la balanza marcó 1000 [g] (1[Kg]).

Figura 4-3: Colocación de muestra de suelo.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-4: Pesaje de muestra de suelo.



Fuente: Elaboración propia.

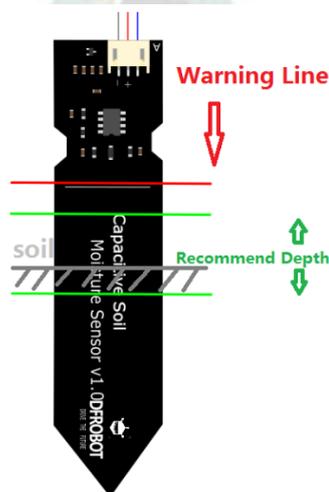
Después de preparar el suelo, se procedió a obtener lecturas de la humedad de suelo presente en la muestra inicial de suelo antes de empezar con la saturación.

4.1.1.3. Medición de humedad de suelo.

Para la medida de humedad de suelo, se realizó los siguientes pasos:

- a) Se colocó el sensor de forma vertical, siguiendo las recomendaciones ilustradas en la figura.

Figura 4-5: Rango de medición.



Fuente:

https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193.

Figura 4-6: Colocación de sensor en suelo.



Fuente: Elaboración propia.

Se marcó el sensor mediante un masquín como se muestra en la figura, para asegurar su correcta posición.

- b) Se conectó la Placa Arduino mediante USB al computador y se abrió el puerto serial para obtener las lecturas.
- c) Se esperó a que la lectura se estabilice en un valor aproximado y se tomó nota de dicho valor.
- d) Se tomó una submuestra de suelo del contenedor de calibración
- e) Se insertó completamente un muestreador volumétrico de suelo en la muestra.
- f) Se colocó el contenedor de secado en la balanza y se colocó el punto 0 (tara).
- g) Se vertió la muestra en el contenedor y se tomó medida de peso.
- h) Se etiquetó el contenedor de secado de suelo, identificando el número de la submuestra.

4.1.1.4. Saturación de muestra de suelo.

Para la saturación de muestra se realizó los siguientes pasos.

- a) Se colocó inicialmente un contenedor vacío, para luego añadir el agua necesaria para comenzar la saturación.

Figura 4-7: Pesaje de agua para saturación.



Fuente: Elaboración propia.

- b) Se agregó agua al suelo de calibración, agregando de manera uniforme 0,5 [ml] de agua por cada 10 [ml] de volumen de suelo.
- c) Se mezcló manualmente el suelo hasta conseguir una mezcla homogénea.

Figura 4-8: Mezcla manual de suelo con agua añadida.



Fuente: Elaboración propia.

- d) Se repitieron los pasos desde el acápite 4.1.1.3. aumentando el nivel de saturación.

4.1.1.5. Cambio de suelo.

Para el cambio de suelo, se repitió los pasos del acápite 4.1.1.2., siguiendo los pasos que corresponden hasta el acápite 4.1.1.4.

4.1.1.6. Secado de muestras.

Para el secado de muestras, se realizaron los siguientes pasos:

- a) Se llevaron las muestras al laboratorio de Suelos LAFASA.
- b) Se colocaron las muestras obtenidas en el horno, mismo que se dejó a una temperatura de 105[°C], dejando secar las muestras durante 24 horas.

Figura 4-9: Secado de muestras en horno del LAFASA



Fuente: Elaboración propia.

- c) Luego de pasadas las 24 horas, se sacó las muestras del horno para su respectivo pesaje, obteniendo los datos necesarios para determinar la VWC en cada etapa de la calibración.

4.1.1.7. Consideraciones adicionales.

Durante el trabajo de investigación se observó un comportamiento bastante peculiar al momento de obtener los datos RAW de los sensores. Los datos RAW variaban de forma considerable (en algunos casos) cuando se conectaba los sensores a distintos pines analógicos, considerando dichas observaciones, se realizará dos calibraciones, tomando en cuenta lo siguiente.

Calibración 1:

- Todos los sensores se conectaron a un solo pin analógico para obtener las lecturas de calibración.
- Luego de obtener los datos de calibración, se asignó cada sensor a los pines analógicos del 0 al 8, pines desde los cuales comenzaron a recolectar datos del sistema en funcionamiento.

- Se calibraron cada 3 sensores con un tipo de suelo en un solo contenedor de calibración.

Calibración 2:

- Cada sensor se conectó a un pin analógico correspondiente del 0 al 8.
- La asignación del pin fue la misma tanto en la calibración como durante el funcionamiento del sistema.
- Se calibraron cada 3 sensores con un tipo de suelo, mediante un contenedor de calibración asignado a cada sensor, que en este caso vendría siendo la misma maceta donde se realizó la recolección de datos.

4.1.2. Datos del proceso de calibración.

Los datos obtenidos del proceso de calibración, son los siguientes:

Tabla 4-1: Datos RAW de calibración 1.

Punto de calibración	SUELO 1			SUELO 2			SUELO 3		
	Lectura del sensor 1	Lectura del sensor 2	Lectura del sensor 3	Lectura del sensor 4	Lectura del sensor 5	Lectura del sensor 6	Lectura del sensor 7	Lectura del sensor 8	Lectura del sensor 9
1	750	750	755	796	783	794	702	671	687
2	676	685	670	747	735	752	676	648	657
3	655	674	656	727	707	728	548	575	592
4	645	654	644	655	641	669	514	467	478
5	620	645	635	624	622	629	454	431	431

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-2: Datos RAW de calibración 2.

Punto de calibración	SUELO 1			SUELO 2			SUELO 3		
	Lectura del sensor 1	Lectura del sensor 2	Lectura del sensor 3	Lectura del sensor 4	Lectura del sensor 5	Lectura del sensor 6	Lectura del sensor 7	Lectura del sensor 8	Lectura del sensor 9
1	719	694	741	784	753	764	678	684	613
2	424	563	555	482	356	525	553	572	547
3	389	400	365	358	340	371	502	487	480
4	365	387	346	356	337	372	521	473	472
5	344	363	322	334	322	353	475	451	436

Fuente: Elaboración propia.

Las muestras obtenidas durante el proceso de calibración fueron pesadas antes y después de ingresarlas al horno.

Para la obtención del VWC por método gravimétrico, se consideró la siguiente ecuación:

$$VWC_{grav} = \frac{v_{agua}}{(m_{total}/\rho_{suelo})} \text{ Ecuación 4-1}$$

Para el presente trabajo, se tendrá preferencia este valor expresado en porcentaje:

$$VWC_{grav} \% = \frac{v_{agua}}{(m_{total}/\rho_{suelo})} * 100\% \text{ Ecuación 4-2}$$

El volumen de agua se obtuvo de la masa de agua, calculada por diferencia de masas mediante la Ecuación 2-1, obteniendo el volumen de agua mediante la siguiente ecuación:

$$v_{agua} = \frac{m_{agua}}{\rho_{agua}} \text{ Ecuación 4-3}$$

Considerando que la densidad del agua es $1 \left[\frac{g}{cm^3} \right]$.

La densidad del suelo está en función del tipo de suelo al cual fue calibrado el sensor, tomando en cuenta la designación de la Tabla 3-7 y las propiedades de los suelos especificados en la Tabla 3-5.

Por lo cual, se obtuvieron los siguientes resultados.

Tabla 4-3: Valores de VWC obtenidos por método gravimétrico Suelo 1.

SUELO 1				
Punto de calibración	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav} \%$
1	30,11	28,87	1,24	5,07
2	27,89	24,82	3,07	13,54
3	37,55	32,95	4,60	15,07
4	33,10	28,11	4,99	18,54
5	38,31	30,95	7,36	23,63

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-4: Valores de VWC obtenidos por método gravimétrico Suelo 2.

SUELO 2				
Punto de calibración	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
1	22,01	19,24	2,77	17,62
2	23,45	20,02	3,43	20,48
3	26,75	22,25	4,50	23,55
4	27,47	22,02	5,45	27,78
5	26,87	21,03	5,84	30,43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-5: Valores de VWC obtenidos por método gravimétrico Suelo 3.

SUELO 3				
Punto de calibración	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
1	38,10	35,79	2,31	7,46
2	41,32	37,90	3,42	10,18
3	43,74	38,75	4,99	14,03
4	60,35	51,62	8,73	17,79
5	70,67	59,74	10,93	19,02

Fuente: Elaboración propia.

4.1.3. Obtención de ecuación de calibración.

A continuación, se muestra la obtención de las ecuaciones de calibración

4.1.3.1. Curvas de calibración Suelo 1.

Para el primer suelo, suelo arcilloso, se utilizarán los 3 primeros sensores (ver Tabla 3-8), por lo cual, las ecuaciones de calibración de los sensores que interactúan con este tipo de suelo se muestran a continuación.

4.1.3.1.1. Sensor 1.

Durante la calibración 1, se obtuvieron los siguientes datos:

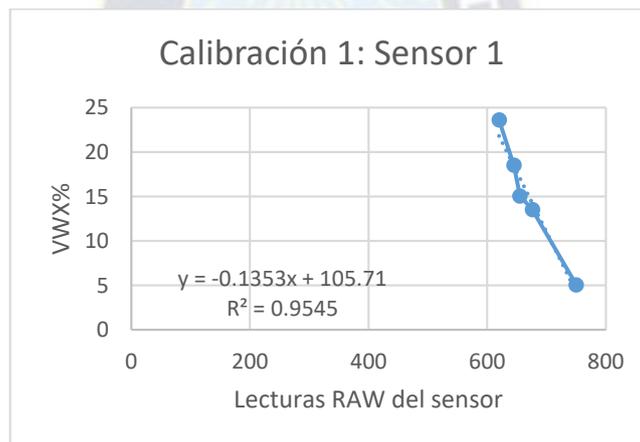
Tabla 4-6: Datos de calibración 1 Sensor 1, Suelo 1.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 1 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	750	5,07
2	676	13,54
3	655	15,07
4	645	18,54
5	620	23,63

Fuente: Elaboración propia.

Por lo cual, la curva de calibración obtenida se muestra a continuación.

Figura 4-10: Curva de calibración 1 Sensor 1, Suelo 1.



Fuente: Elaboración propia.

Así mismo, se procedió con la calibración 2, cuyos datos se muestran en la siguiente tabla:

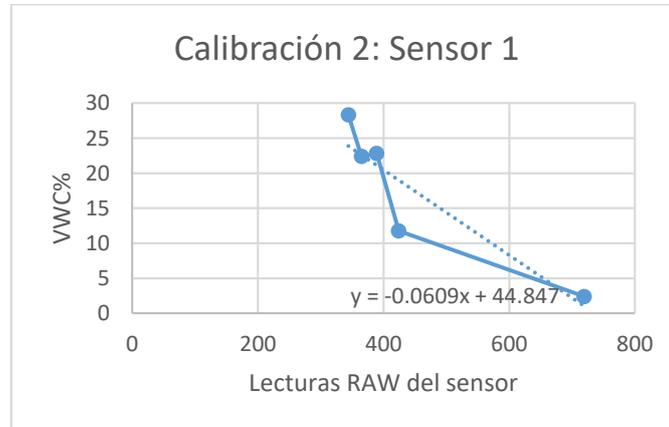
Tabla 4-7: Datos de calibración 2 Sensor 1, Suelo 1.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 1 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	719	2,42
3	424	11,77
4	389	22,83
5	365	22,40
6	344	28,34

Fuente: Elaboración propia.

Teniendo como consecuencia la siguiente curva de calibración:

Figura 4-11: Curva de calibración 2 Sensor 1, Suelo 1.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.1.2. Sensor 2.

Durante la calibración 1, se obtuvieron los siguientes datos:

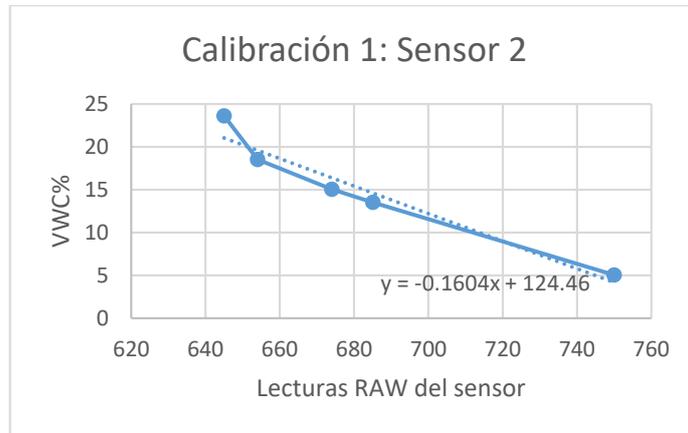
Tabla 4-8: Datos de calibración 1 Sensor 2, Suelo 1.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 2 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	750	5,07
2	685	13,54
3	674	15,07
4	654	18,54
5	645	23,63

Fuente: Elaboración propia.

Cuya curva de calibración se aprecia en la siguiente figura:

Figura 4-12: Curva de calibración 1 Sensor 2, Suelo 1.



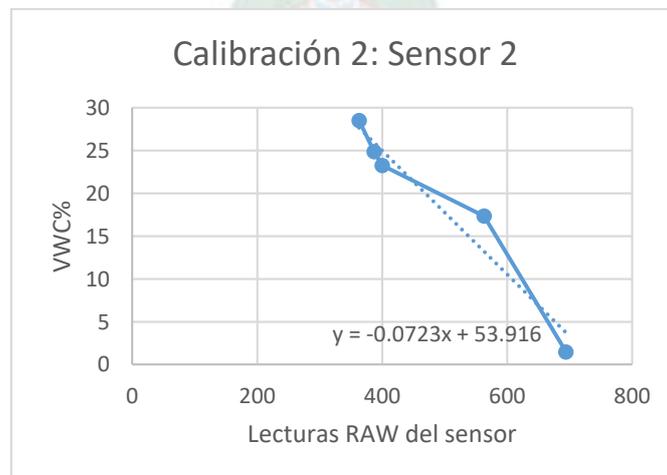
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-9: Datos de calibración 2 Sensor 2, Suelo 1.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 2 (Eje X)	VWC _{grav} % (Eje Y)
1	694	1,48
2	563	17,35
3	400	23,27
4	387	24,87
5	363	28,52

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-13: Curva de calibración 2 Sensor 2, Suelo 1



Fuente: Elaboración propia.

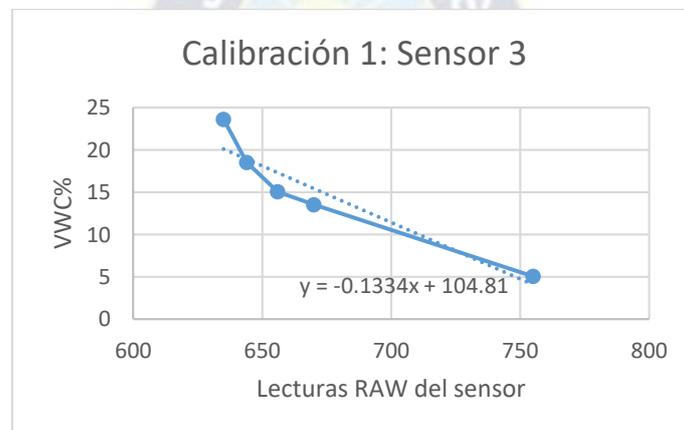
4.1.3.1.3. Sensor 3.

Tabla 4-10: Datos de calibración 1 Sensor 3, Suelo 1

Muestra	Lecturas RAW del sensor 3 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	755	5,07
2	670	13,54
3	656	15,07
4	644	18,54
5	635	23,63

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-14: Curva de calibración 1 Sensor 3, Suelo 1.



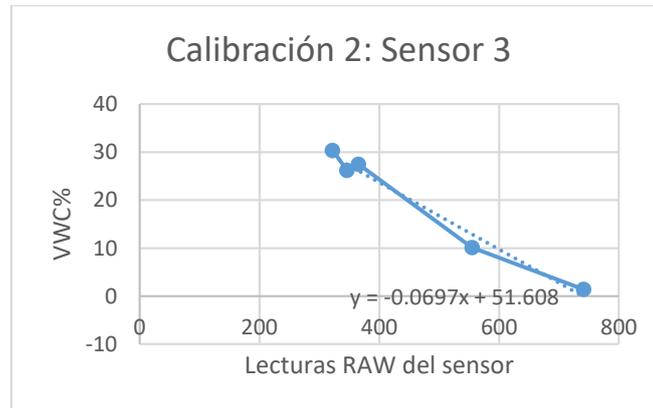
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-11: Datos de calibración 2 Sensor 3, Suelo 1.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 3 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	741	1,42
2	555	10,12
3	365	27,50
4	346	26,20
5	322	30,39

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-15: Curva de calibración 2 Sensor 3, Suelo 1



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.2. Curvas de calibración Suelo 2.

Para el segundo suelo, suelo franco, se utilizarán los 3 sensores que siguen (ver Tabla 3-8), por lo cual los datos de calibración obtenidas para cada sensor son los siguientes.

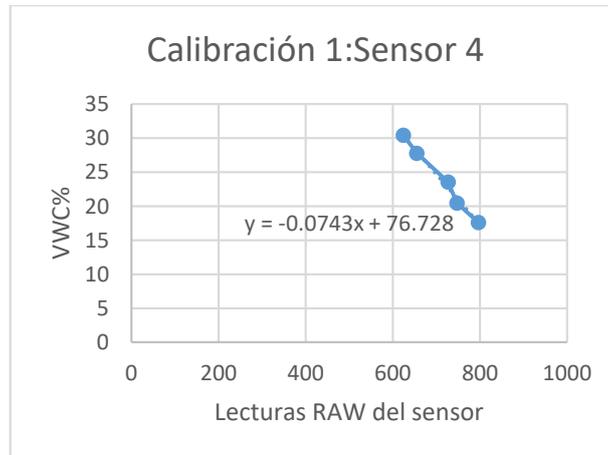
4.1.3.2.1. Sensor 4.

Tabla 4-12: Datos de calibración Sensor 4, Suelo 2.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 4 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	796	17,62
2	747	20,48
3	727	23,55
4	655	27,78
5	624	30,43

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-16: Curva de calibración 1 Sensor 4, Suelo 2.



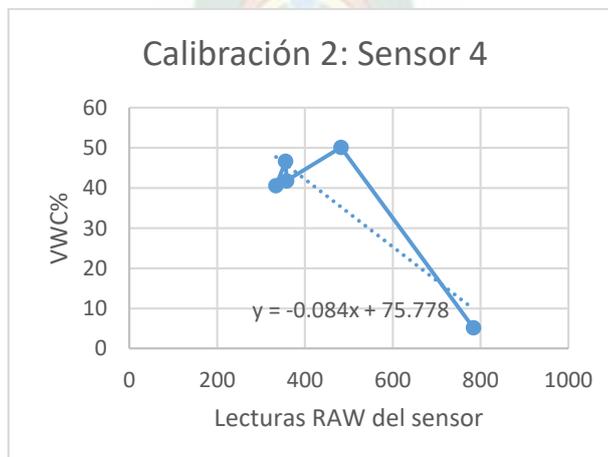
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-13: Datos de calibración 2 Sensor 4, Suelo 2.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 4 (Eje X)	VWC _{grav} % (Eje Y)
1	784	5,17
2	482	5,14
3	358	4,80
4	356	46,71
5	334	40,61

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-17: Curva de calibración 2 Sensor 4, Suelo 2.



Fuente: Elaboración propia.

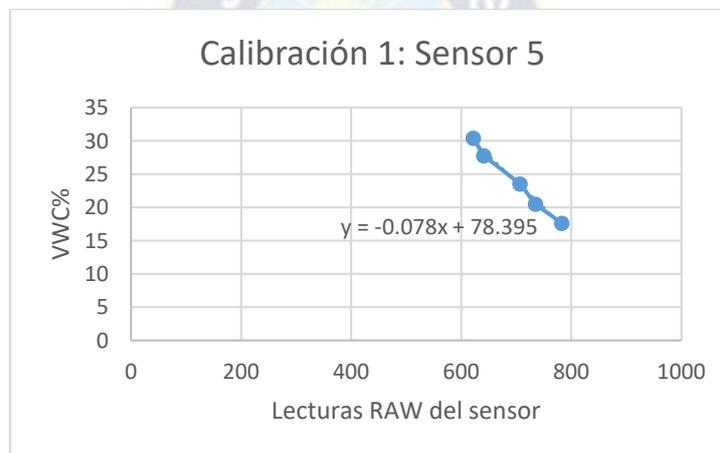
4.1.3.2.2. Sensor 5.

Tabla 4-14: Datos de calibración Sensor 5, Suelo 2.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 5 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	783	17,62
2	735	20,48
3	707	23,55
4	641	27,78
5	622	30,43

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-18: Curva de calibración 1 Sensor 5, Suelo 2.



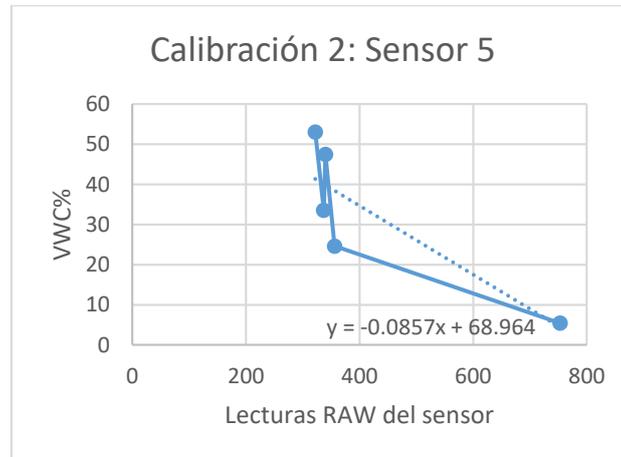
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-15: Datos de calibración 2 Sensor 5, Suelo 2.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 5 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	753	5,45
2	356	24,64
3	340	47,51
4	337	33,54
5	322	53,08

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-19: Curva de calibración 2 Sensor 5, Suelo 2



Fuente: Elaboración propia.

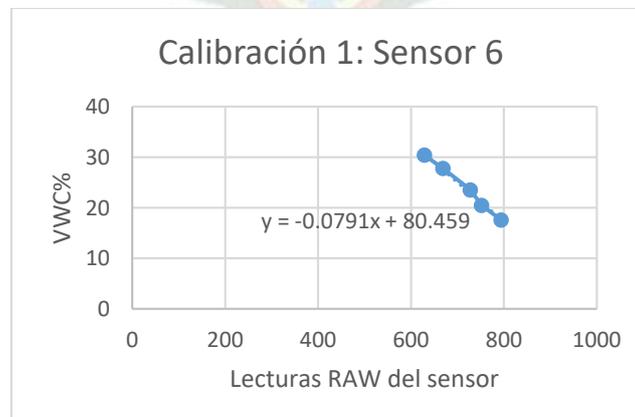
4.1.3.2.3. Sensor 6.

Tabla 4-16: Datos de calibración Sensor 6, Suelo 2.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 6 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	794	17,62
2	752	20,48
3	728	23,55
4	669	27,78
5	629	30,43

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-20: Gráfica de dispersión Sensor 6, Suelo 2.



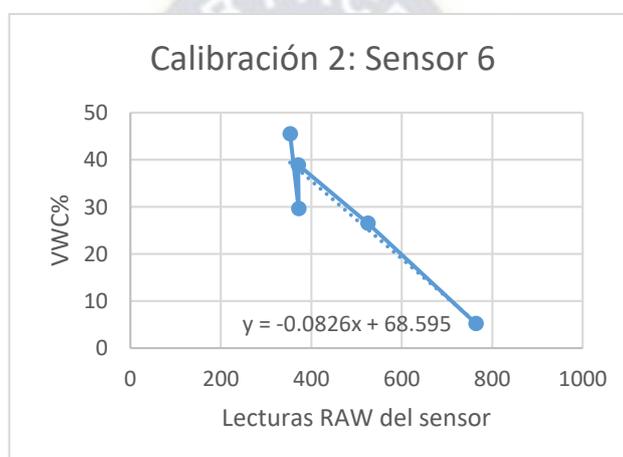
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-17: Datos de calibración 2 Sensor 6, Suelo 2.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 6 (Eje X)	VWC _{grav} % (Eje Y)
1	764	5,27
3	525	26,56
4	371	38,95
5	372	29,66
6	353	45,54

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-21: Curva de calibración 2 Sensor 6, Suelo 2.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.3. Curvas de calibración Suelo 3.

Para el tercer suelo, suelo arenoso, se utilizarán los 3 últimos sensores (ver Tabla 3-8), por lo cual sus datos de calibración de cada sensor se muestran a continuación.

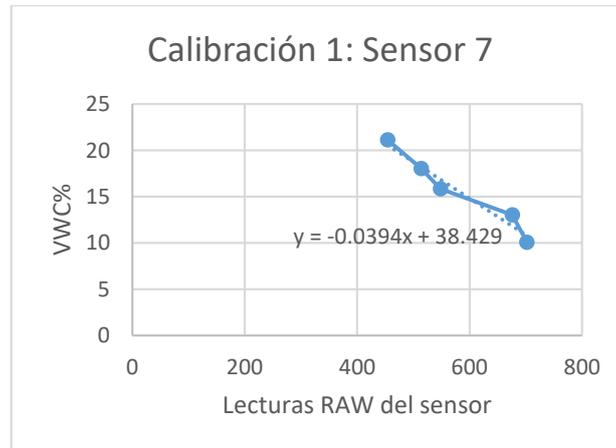
4.1.3.3.1. Sensor 7.

Tabla 4-18: Datos de calibración Sensor 7, Suelo 3.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 7 (Eje X)	VWC _{grav} % (Eje Y)
1	702	15,68
2	676	21,85
3	548	24,65
4	514	28,02
5	454	32,24

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-22: Curva de calibración 1 Sensor 7, Suelo 3.



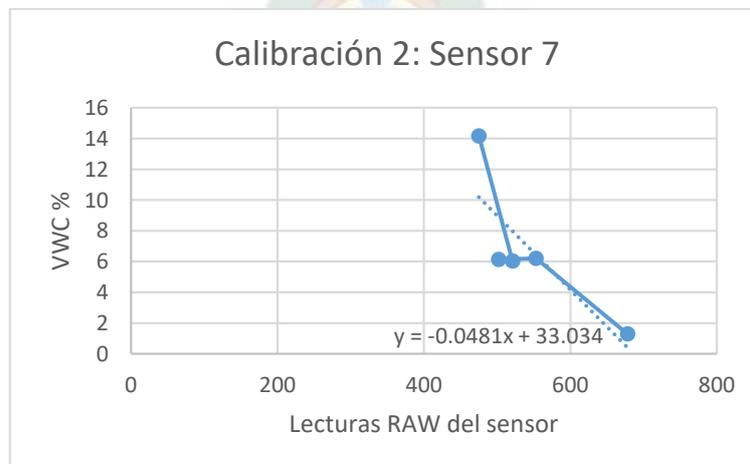
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-19: Datos de calibración 2 Sensor 7, Suelo 3.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 7 (Eje X)	VWC _{grav} % (Eje Y)
1	678	1,30
2	553	6,21
3	502	6,14
4	521	6,05
5	475	14,18

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-23: Curva de calibración 2 Sensor 7, Suelo 3.



Fuente: Elaboración propia.

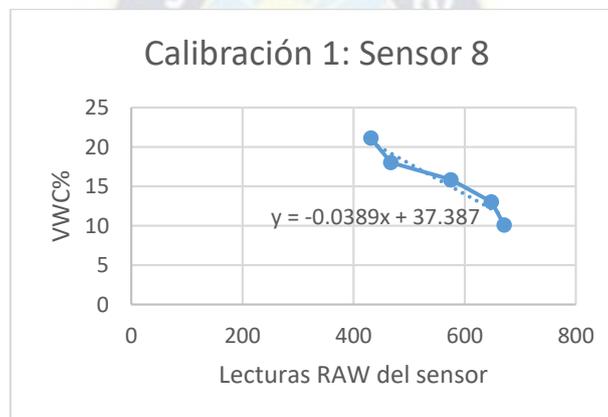
4.1.3.3.2. Sensor 8.

Tabla 4-20: Datos de calibración 1 Sensor 8, Suelo 3.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 8 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	671	15,68
2	648	21,85
3	575	24,65
4	467	28,02
5	431	32,24

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-24: Curva de calibración 1 Sensor 8, Suelo 3.



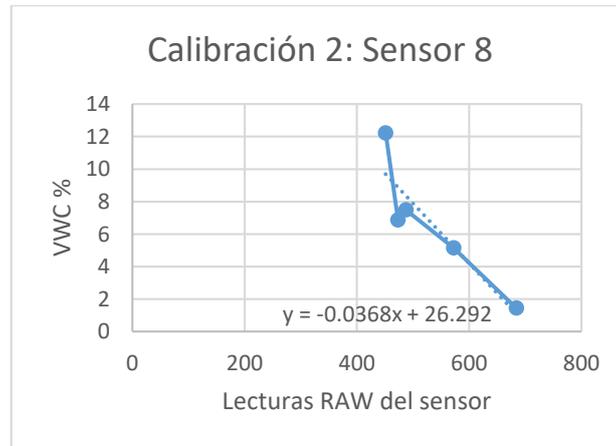
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-21: Datos de calibración 2 Sensor 8, Suelo 3.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 8 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	684	1,46
2	572	5,16
3	487	7,50
4	473	6,89
5	451	12,24

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-25: Curva de calibración 2 Sensor 8, Suelo 3.



Fuente: Elaboración propia.

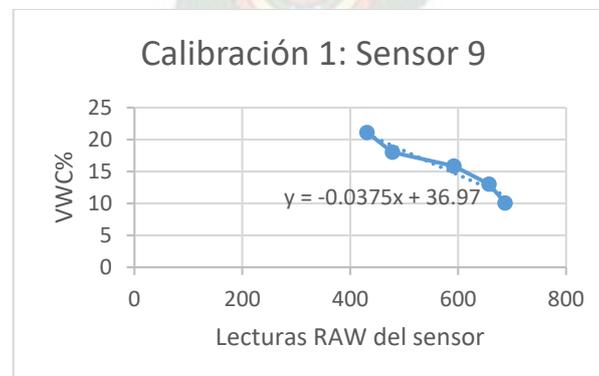
4.1.3.3.3. Sensor 9.

Tabla 4-22: Datos de calibración 1 Sensor 9, Suelo 3.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 9 (Eje X)	$VWC_{grav}\%$ (Eje Y)
1	687	15,68
2	657	21,85
3	592	24,65
4	478	28,02
5	431	32,24

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-26: Curva de calibración 1 Sensor 9, Suelo 3.



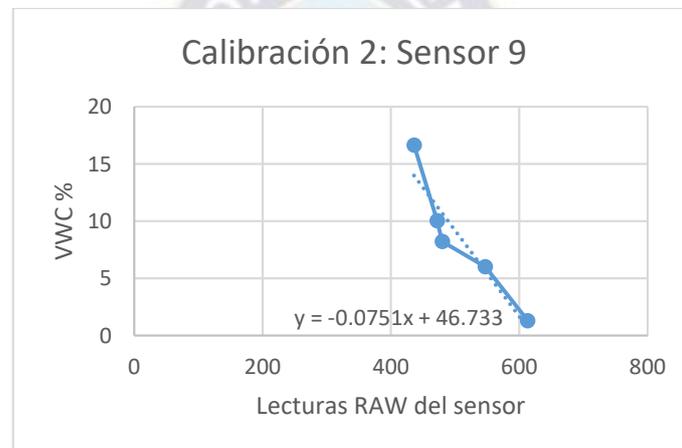
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-23: Datos de calibración 2 Sensor 9, Suelo 3.

Muestra	Lecturas RAW del sensor 9 (Eje X)	$VWC_{grav} \%$ (Eje Y)
1	613	1,32
2	547	6,03
3	480	8,23
4	472	10,06
5	436	16,67

Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-27: Curva de calibración 2 Sensor 9, Suelo 3.



Fuente: Elaboración propia.

4.1.3.4. Ecuaciones de calibración.

Como pudo observarse anteriormente, cada figura donde se muestra la curva de calibración asociada a los datos recolectados de parte del sensor y por método gravimétrico, se aprecia en la parte inferior de la misma una ecuación lineal, dicha ecuación lineal fue implementada en la programación de la placa Arduino para el sistema automático de riego.

Por lo tanto, las ecuaciones de calibración se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 4-24: Ecuaciones de calibración, calibración 1

Ecuaciones de calibración		
Suelo	Sensor	Ecuación
	1	$y = -0,1353x + 105,71$
1	2	$y = -0,1604x + 124,46$
	3	$y = -0,1334x + 104,81$
	4	$y = -0,0743x + 76,728$
2	5	$y = -0,078x + 78,395$
	6	$y = -0,0791x + 80,459$
	7	$y = -0,0394x + 38,429$
3	8	$y = -0,0389x + 37,387$
	9	$y = -0,0375x + 36,97$

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-25: Ecuaciones de calibración, calibración 2.

Suelo	Sensor	Ecuación
	1	$y = -0,0609x + 44,847$
1	2	$y = -0,0723x + 53,916$
	3	$y = -0,0697x + 51,608$
	4	$y = -0,084x + 75,778$
2	5	$y = -0,0857x + 68,964$
	6	$y = -0,0817x + 68,624$
	7	$y = -0,0481x + 33,034$
3	8	$y = -0,0368x + 26,292$
	9	$y = -0,0751x + 46,733$

Fuente: Elaboración propia.

En las tablas 4-24 y 4-25 se observa que todas las ecuaciones son lineales de la forma “ $y=a*x+b$ ” donde la variable “ y ” es la lectura VWC expresado en porcentaje, y la variable “ x ” son los valores ADC en los pines analógicos debido a los sensores. La constante “ a ” representa la pendiente de la ecuación indicando el porcentaje que disminuye a medida que la variable “ x ” crece; la constante “ b ” representa la humedad máxima que el sensor puede detectar en dicho suelo.

4.1.4. Tiempo de respuesta de sensores.

Para el tiempo de respuesta de los sensores, se lo realizó en conjunto con la calibración, debido a que bajo dichas condiciones controladas se podrá obtener resultados más precisos.

La toma de datos se lo realizó de la siguiente manera.

- a) En el instante en el cual se toma lectura analógica de la humedad de suelo, se cronometrará el tiempo en el cual tarde en estabilizarse al nuevo valor debido al cambio de humedad, dicho valor cronometrado se lo realizará mediante un programa en la IDE de Arduino (ver Anexo C).

Figura 4-28: Lectura de tiempos de respuesta de los sensores.

```

COM13
Lectura=566---Lectura anterior=572--Tiempo de cambio [ms]=1352
Lectura=565---Lectura anterior=572--Tiempo de cambio [ms]=1352
Lectura=568---Lectura anterior=572--Tiempo de cambio [ms]=1352
Lectura=564---Lectura anterior=572--Tiempo de cambio [ms]=1352
Lectura=565---Lectura anterior=572--Tiempo de cambio [ms]=1352
Lectura=564---Lectura anterior=572--Tiempo de cambio [ms]=1352
Lectura=562---Lectura anterior=572--Tiempo de cambio [ms]=1352
Lectura=565---Lectura anterior=572--Tiempo de cambio [ms]=1352
Lectura=561---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=560---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=563---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=560---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=561---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=559---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=557---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=560---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=557---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=557---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=556---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=555---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=558---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=554---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=554---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
Lectura=555---Lectura anterior=561--Tiempo de cambio [ms]=1420
    
```

Fuente: Elaboración propia.

- b) Dichas lecturas fueron exportados a un archivo .txt.
 c) Los tiempos cronometrados que se consideraron fueron aquellos que suscitaban cambios al instante de saturar el suelo con agua.
 d) El procedimiento fue aplicado a cada sensor, obteniendo los siguientes datos.

Tabla 4-26: Tiempo de respuesta de los sensores.

Punto de calibración	Tiempo de lectura sensor 1 [ms]	Tiempo de lectura sensor 2 [ms]	Tiempo de lectura sensor 3 [ms]	Tiempo de lectura sensor 4 [ms]	Tiempo de lectura sensor 5 [ms]	Tiempo de lectura sensor 6 [ms]	Tiempo de lectura sensor 7 [ms]	Tiempo de lectura sensor 8 [ms]	Tiempo de lectura sensor 9 [ms]
1	998	1014	1217	1622	1555	1598	1757	1420	1217
2	1284	2197	3312	1014	1305	1065	2502	1284	1555
3	2027	1420	1375	1216	2029	1486	2028	1488	2906
4	1285	1690	1622	1284	1217	1082	1081	1198	982
5	1082	1179	1081	1015	1487	1083	1622	1420	1352

Fuente: Elaboración propia.

4.1.5. Datos del sistema en funcionamiento.

Para la recolección de datos del sistema en funcionamiento, se dispusieron las 9 macetas en una fila.

Figura 4-29: Disposición de macetas en el laboratorio.



Fuente: Elaboración propia.

Cada 3 macetas se coloca un determinado tipo de suelo según lo propuesto en la Tabla 3-10. Así mismo, el sistema cuenta con un sistema de riego por goteo, por lo cual el punto de goteo se ubica próximos al centro de la maceta.

Figura 4-30: Disposición del punto de goteo y sensor en la maceta.



Fuente: Elaboración propia.

De la anterior figura, como puede apreciarse el sensor está ubicado en proximidades del punto de goteo, esto con el fin de obtener los datos de cambio de humedad de forma rápida.

Todos los sensores se conectan a un punto central, donde se observará mediante un display los datos en tiempo real de la humedad, y a su vez, se guardará los datos de los sensores en una memoria micro SD.

Figura 4-31: Panel central del sistema automático de riego.



Fuente: Elaboración propia.

Luego de acomodar apropiadamente el sistema de riego automático, se pasó a la parte de recolección de datos, para ello, la recolección de datos se lo realiza bajo el siguiente procedimiento.

4.1.5.1. Recolección de muestras para método gravimétrico.

Para la recolección de muestra se utilizó un contenedor de secado, dentro del cual se debía colocar las muestras a ser analizadas.

La muestra se recolectó cerca a la ubicación del sensor (en cada una de las macetas), y se anotó en conjunto a la hora la cual fue recolectada dicha muestra (para comparar con los datos registrados por el sensor).

Para contemplar solo la masa de suelo añadido, se obtuvo previamente la masa de cada uno de los contenedores, etiquetando cada uno de los mismos para luego obtener solamente lectura de la masa de muestra de suelo mediante diferencia de masas.

Figura 4-32: Obtención de las masas de las muestras.



Fuente: Elaboración propia.

Secado de muestra.

Para el secado de las muestras, fueron colocadas dentro de un horno, que, debido a la gran cantidad de muestras recolectadas, debían permanecer 48 horas dentro del mismo.

Figura 4-33: Proceso de secado de las muestras de suelo de las macetas



Fuente: Elaboración propia.

Luego de las 48 horas, se procedió a sacar las muestras y pesar las mismas con la balanza digital.

Figura 4-34: Muestras de macetas secadas.



Fuente: Elaboración propia.

Con los datos de las masas antes y después del secado, se obtuvo el VWC por método gravimétrico como se observa en las siguientes tablas.

Tabla 4-27: VWC por método gravimétrico, maceta 1.

Hora de recolección	Dato recolectado	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
18:26	1	13,21	12,95	0,26	2,42
19:27	2	10,23	8,83	1,40	16,83
12:51	3	7,84	7,09	0,75	11,77
14:07	4	14,17	11,54	2,63	22,83
14:25	5	10,16	8,31	1,85	22,40
15:16	6	16,10	12,39	3,71	28,34

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-28: VWC por método gravimétrico, maceta 2.

Hora de recolección	Dato recolectado	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
18:26	1	12,46	12,31	0,15	1,48
19:27	2	11,61	9,93	1,68	17,80
12:51	3	10,14	8,71	1,43	17,35
14:07	4	13,27	10,76	2,51	23,27
14:25	5	13,70	10,93	2,77	24,87
15:16	6	12,81	9,84	2,97	28,52

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-29: VWC por método gravimétrico, maceta 3.

Hora de recolección	Dato recolectado	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
18:26	1	10,43	10,31	0,12	1,42
19:27	2	10,35	8,82	1,53	18,18
12:51	3	9,12	8,37	0,75	10,12
14:07	4	14,36	11,15	3,21	27,50
14:25	5	12,77	104,05	2,72	26,20
15:16	6	13,60	10,24	3,36	30,39

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-30: VWC por método gravimétrico, maceta 4.

Hora de recolección	Dato recolectado	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
18:26	1	7,85	7,56	0,29	5,17
19:27	2	6,39	5,32	1,07	23,44
12:51	3	8,88	5,70	3,18	50,14
14:07	4	9,31	6,53	2,78	41,80
14:25	5	10,73	7,15	3,58	46,71
15:16	6	10,41	7,39	3,02	40,61

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-31: VWC por método gravimétrico, maceta 5.

Hora de recolección	Dato recolectado	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
18:26	1	8,48	8,15	0,33	5,45
19:27	2	7,83	6,01	1,82	32,54
12:51	3	6,59	5,43	1,16	24,64
14:07	4	12,14	8,02	4,12	47,51
14:25	5	8,64	6,57	2,07	33,54
15:16	6	9,68	6,01	3,67	53,08

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-32: VWC por método gravimétrico, maceta 6.

Hora de recolección	Dato recolectado	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
18:26	1	7,71	7,42	0,29	5,27
19:27	2	14,73	10,98	3,75	35,64
12:51	3	6,22	5,04	1,18	26,56
14:07	4	7,44	5,37	2,07	38,95
14:25	5	8,12	6,40	1,72	29,66
15:16	6	9,10	6,14	2,96	45,54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-33: VWC por método gravimétrico, maceta 7.

Hora de recolección	Dato recolectado	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
18:26	1	13,08	12,98	0,10	1,30
19:27	2	15,20	15,09	0,11	1,23
12:51	3	15,88	15,30	0,58	6,21
14:07	4	11,36	10,95	0,41	6,14
14:25	5	12,09	11,66	0,43	6,05
15:16	6	15,46	14,17	1,29	14,18

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-34: VWC por método gravimétrico, maceta 8.

Hora de recolección	Dato recolectado	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
18:26	1	14,01	13,89	0,12	1,46
19:27	2	14,17	14,06	0,11	1,32
12:51	3	16,79	16,28	0,51	5,16
14:07	4	13,83	13,22	0,61	7,50
14:25	5	11,59	11,12	0,47	6,89
15:16	6	14,45	13,41	1,04	12,24

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-35: VWC por método gravimétrico, maceta 9.

Hora de recolección	Dato recolectado	Masa de muestra suelo antes de secado [g]	Masa de muestra suelo después de secado [g]	Masa de agua [g]	$VWC_{grav}\%$
18:26	1	14,21	14,1	0,11	1,32
19:27	2	14,02	13,88	0,14	1,70
12:51	3	14,93	14,40	0,53	6,03
14:07	4	13,42	12,77	0,65	8,23
14:25	5	12,84	12,08	0,76	10,06
15:16	6	14,48	13,06	1,42	16,67

Fuente: Elaboración propia.

Para el VWC por método gravimétrico se consideró los datos de densidad aparente de suelo, así como las ecuaciones vistas en la anterior sección.

4.1.5.2. Lecturas del sistema.

Las lecturas de los sensores fueron obtenidas mediante la memoria micro SD.

Figura 4-35: Memoria micro SD del sistema automático de Riego.



Fuente: Elaboración propia.

En dicha memoria micro SD, se creó un archivo sin extensión, que al momento de colocar una extensión “.csv” este se convierte en un archivo Excel, mediante el cual facilita la lectura y exportación de datos del sistema automático de riego.

Con el fin de realizar la comparación, se tomaron en cuenta solo los valores registrados en las horas donde se realizó la recolección de muestras de suelo. Así mismo, debido a que las lecturas tenían oscilaciones, se tomó en cuenta 5 datos en cada instante de la recolección de muestras, en un rango de 1 minuto antes del mismo.

Tabla 4-36: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 1 (Calibración 1).

Hora de recolección	Dato recolectado	VWC_{dat1}	VWC_{dat2}	VWC_{dat3}	VWC_{dat4}	VWC_{dat5}
18:26	1	8,29	8,56	8,16	8,43	8,84
19:27	2	46,99	46,85	47,13	47,13	46,99
12:51	3	48,21	46,04	48,07	48,21	48,34
14:07	4	53,21	53,08	52,81	53,35	52,94
14:25	5	56,46	56,33	56,05	56,19	53,89
15:16	6	59,94	58,90	59,17	59,44	59,03

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-37: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 2 (Calibración 1).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	13,14	14,75	14,91	15,07	14,59
19:27	2	31,43	31,59	31,75	31,11	30,95
12:51	3	34,15	33,83	31,27	33,99	34,15
14:07	4	60,30	60,46	60,62	60,30	60,14
14:25	5	59,98	62,55	61,9	62,22	62,09
15:16	6	66,23	66,4	66,72	70,73	65,91

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-38: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 3 (Calibración 1).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	7,56	7,43	7,83	7,29	7,69
19:27	2	33,17	33,04	32,91	32,91	33,44
12:51	3	30,11	30,37	30,24	27,70	30,51
14:07	4	55,99	56,12	55,85	56,25	56,39
14:25	5	58,39	58,52	58,25	57,59	58,65
15:16	6	61,99	65,32	65,19	61,45	65,72

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-39: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 4 (Calibración 1).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	19,44	19,37	18,48	14,02	19,52
19:27	2	34,23	34,30	34,38	34,45	34,45
12:51	3	41,06	39,65	41,29	42,10	41,14
14:07	4	50,05	50,28	50,13	49,98	50,20
14:25	5	49,91	50,13	50,35	50,28	50,50
15:16	6	51,91	51,84	53,92	53,84	51,76

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-40: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 5 (Calibración 1).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	20,75	19,66	20,67	20,83	20,75
19:27	2	51,87	51,80	51,95	51,72	51,64
12:51	3	50,47	50,55	50,63	49,30	51,17
14:07	4	51,95	51,80	52,03	51,87	51,64
14:25	5	51,95	51,87	51,80	51,72	52,19
15:16	6	53,12	53,20	55,38	55,31	55,28

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-41: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 6 (Calibración 1).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	44,15	42,49	40,36	44,31	44,47
19:27	2	48,03	47,87	47,95	47,79	48,11
12:51	3	39,80	38,93	38,85	38,77	39,01
14:07	4	51,11	50,95	51,03	50,88	51,75
14:25	5	51,03	51,51	50,95	51,19	49,93
15:16	6	52,46	54,44	54,59	52,62	52,54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-42: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 7 (Calibración 1).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	11,20	10,66	11,16	11,29	11,25
19:27	2	15,27	15,41	15,45	15,32	15,36
12:51	3	14,59	14,55	14,64	14,50	15,14
14:07	4	16,00	16,13	16,04	16,09	16,18
14:25	5	17,31	17,35	17,40	17,44	17,49
15:16	6	18,35	18,39	19,29	19,25	18,30

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-43: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 8 (Calibración 1).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	10,13	9,55	10,09	10,23	10,18
19:27	2	11,72	11,68	11,54	11,58	11,63
12:51	3	13,12	13,08	13,22	13,17	13,76
14:07	4	17,11	16,93	17,02	16,98	16,88
14:25	5	17,61	17,65	17,70	17,97	17,56
15:16	6	18,52	18,56	18,61	18,47	19,51

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-44: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 9 (Calibración 1).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	11,84	11,19	11,93	11,80	11,88
19:27	2	13,62	13,75	13,70	13,66	13,83
12:51	3	14,65	14,57	14,70	13,57	14,48
14:07	4	17,56	17,47	17,60	17,64	17,51
14:25	5	17,86	17,82	17,73	17,90	17,77
15:16	6	21,24	19,33	19,46	18,60	19,50

Fuente: Elaboración propia.

De igual forma para la calibración 2, los datos obtenidos se muestran a continuación.

Tabla 4-45: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 1 (Calibración 2).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	1,12	0,94	1,06	1,00	1,13
19:27	2	18,42	18,36	18,42	18,54	18,4
12:51	3	19,03	19,09	19,39	19,15	18,96
14:07	4	21,22	21,16	21,10	21,28	21,04
14:25	5	22,56	22,80	22,62	22,50	21,52
15:16	6	25,79	24,02	23,78	25,72	23,96

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-46: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 2 (Calibración 2).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	4,46	4,54	3,74	4,61	4,39
19:27	2	12,13	12,05	11,98	12,20	11,84
12:51	3	13,21	13,79	13,07	12,99	13,14
14:07	4	25,14	25,07	25,00	24,92	25,90
14:25	5	25,86	26,15	25,79	26,01	24,85
15:16	6	29,84	29,70	29,77	27,89	29,41

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-47: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 3 (Calibración 2).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	0,94	0,87	0,80	0,66	0,73
19:27	2	14,04	14,11	14,18	14,25	14,32
12:51	3	12,72	12,79	12,65	13,27	12,58
14:07	4	26,24	26,17	26,10	26,03	26,20
14:25	5	27,35	27,42	27,63	27,49	27,28
15:16	6	30,98	30,91	29,30	31,05	29,23

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-48: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 4 (Calibración 2).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	10,85	10,93	11,01	11,18	11,1
19:27	2	27,56	27,73	27,90	27,83	27,81
12:51	3	35,21	35,29	35,79	35,37	33,86
14:07	4	45,79	45,71	45,87	45,62	45,54
14:25	5	45,79	46,13	45,71	45,87	45,96
15:16	6	49,99	47,55	49,82	47,72	49,91

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-49: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 5 (Calibración 2).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	5,63	5,46	4,43	5,80	5,72
19:27	2	39,74	39,83	39,91	39,65	39,80
12:51	3	38,37	38,45	38,80	38,37	38,28
14:07	4	39,91	39,83	40,00	39,74	39,80
14:25	5	39,74	40,08	39,83	39,91	39,90
15:16	6	43,60	41,20	43,51	41,20	41,45

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-50: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 6 (Calibración 2).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	6,29	6,37	6,25	6,12	6,30
19:27	2	35,13	35,21	35,05	35,54	34,96
12:51	3	25,73	26,30	25,57	25,81	23,69
14:07	4	38,31	38,23	38,40	38,15	38,35
14:25	5	38,23	38,56	38,15	38,40	38,31
15:16	6	41,99	41,74	40,03	39,95	41,83

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-51: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 7 (Calibración 2).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	2,49	2,54	1,96	2,63	2,44
19:27	2	6,82	6,92	6,82	6,87	6,96
12:51	3	6,19	6,53	6,10	6,15	6,24
14:07	4	8,94	8,89	8,84	9,08	9,13
14:25	5	7,88	8,12	7,97	8,45	8,70
15:16	6	11,15	10,14	10,19	9,99	11,10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-52: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 8 (Calibración 2).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	2,85	2,81	2,37	2,92	2,89
19:27	2	3,95	3,99	4,06	4,03	4,10
12:51	3	5,28	5,32	5,57	5,24	5,79
14:07	4	6,68	6,75	6,64	6,79	7,56
14:25	5	8,66	8,85	8,63	8,70	8,74
15:16	6	10,39	9,73	10,47	10,50	10,43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-53: Datos recolectados por sistema de riego, Sensor 9 (Calibración 2).

Hora de recolección	Dato recolectado	$VWC_{dat1}\%$	$VWC_{dat2}\%$	$VWC_{dat3}\%$	$VWC_{dat4}\%$	$VWC_{dat5}\%$
18:26	1	0,77	0,62	0,92	0,85	0,70
19:27	2	3,93	4,00	4,15	4,08	4,23
12:51	3	5,73	6,10	5,50	5,43	5,65
14:07	4	9,63	9,41	9,48	9,63	10,23
14:25	5	11,06	10,91	10,99	10,84	11,21
15:16	6	12,49	12,64	14,21	12,56	12,34

Fuente: Elaboración propia.

4.2. Tratamiento de datos.

Primeramente, para los datos recolectados por la Calibración 1 y 2, se obtuvieron los datos promedios para comparar con los datos obtenidos por el método gravimétrico:

Tabla 4-54: Valores promedios de los datos recolectados por el sistema (Calibración 1).

N° de dato	SUELO 1			SUELO 2			SUELO 3		
	Maceta 1, Sensor 1	Maceta 2, Sensor 2	Maceta 3, Sensor 3	Maceta 4, Sensor 4	Maceta 5, Sensor 5	Maceta 6, Sensor 6	Maceta 7, Sensor 7	Maceta 8, Sensor 8	Maceta 9, Sensor 9
1	$VWC_{prom}\%$								
1	8,46	14,49	7,56	18,17	20,53	43,16	11,11	10,04	11,73
2	47,02	31,37	33,09	34,36	51,80	47,95	15,36	11,63	13,71
3	47,77	33,48	29,79	41,05	50,42	39,07	14,68	13,27	14,39
4	53,08	60,36	56,12	50,13	51,86	51,14	16,09	16,98	17,56
5	55,78	61,75	58,28	50,23	51,91	50,92	17,40	17,70	17,82
6	59,30	67,20	63,93	52,65	54,46	53,33	18,72	18,73	19,63

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-55: Valores promedios de los datos recolectados por el sistema (Calibración 2).

N° de dato	SUELO 1			SUELO 2			SUELO 3		
	Maceta 1, Sensor 1	Maceta 2, Sensor 2	Maceta 3, Sensor 3	Maceta 4, Sensor 4	Maceta 5, Sensor 5	Maceta 6, Sensor 6	Maceta 7, Sensor 7	Maceta 8, Sensor 8	Maceta 9, Sensor 9
	$VWC_{prom}\%$								
1	1,05	4,35	0,80	11,01	5,41	6,27	2,41	2,77	0,77
2	18,43	12,04	14,18	27,77	39,79	35,18	6,88	4,03	4,08
3	19,12	13,24	12,80	35,10	38,45	25,42	6,24	5,44	5,68
4	21,16	25,21	26,15	45,71	39,86	38,29	8,98	6,88	9,68
5	22,40	25,73	27,43	45,89	39,89	38,33	8,22	8,72	11,00
6	24,65	29,32	30,29	49,00	42,19	41,11	10,51	10,3	12,85

Fuente: Elaboración propia.

Mediante estos datos promediados, se procederá a realizar la comparación con los valores del método gravimétrico.

4.2.1. Análisis de regresión.

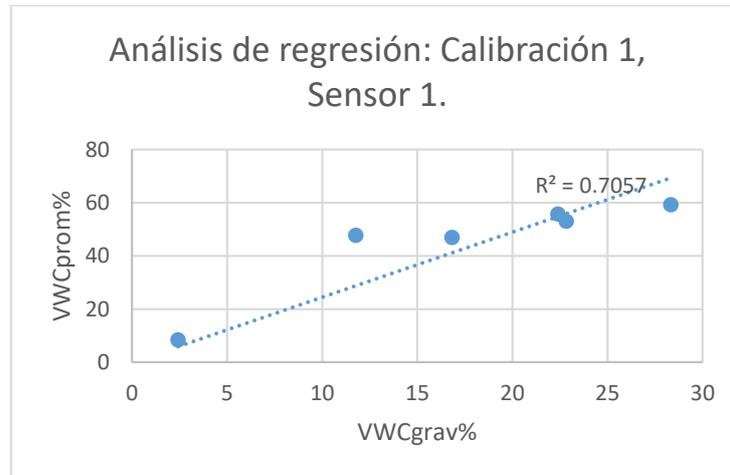
Se ajustará una línea de regresión y mediante la evaluación de la intersección y el coeficiente de determinación R^2 se evaluará la relación entre las mediciones de referencia, cuyo valor ideal debería ser cercano a uno.

Primeramente, se observará de forma individual y posteriormente de forma general por tipo de suelo.

4.2.1.1. Para cada sensor.

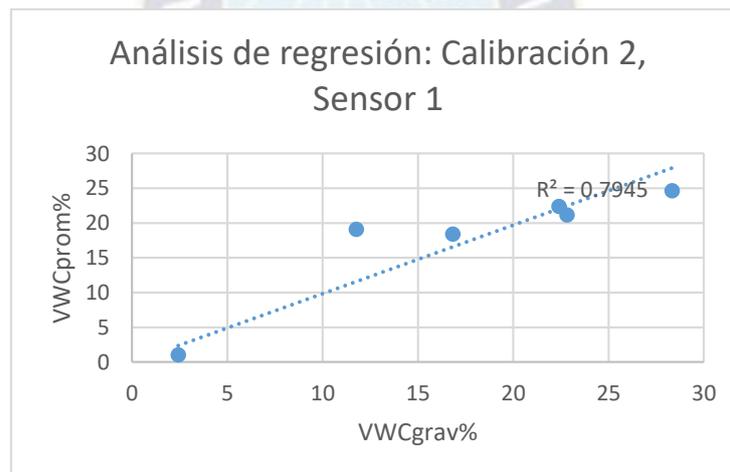
4.2.1.1.1. Sensor 1.

Figura 4-36: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 1.



Fuente: Elaboración propia.

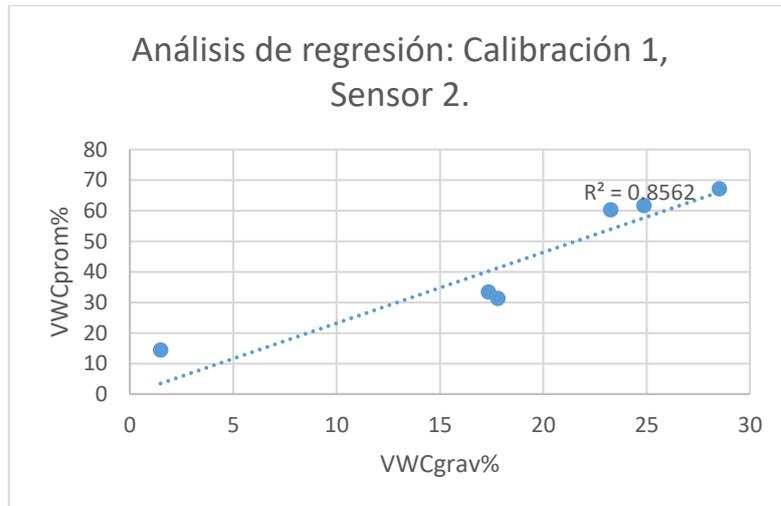
Figura 4-37: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 1.



Fuente: Elaboración propia.

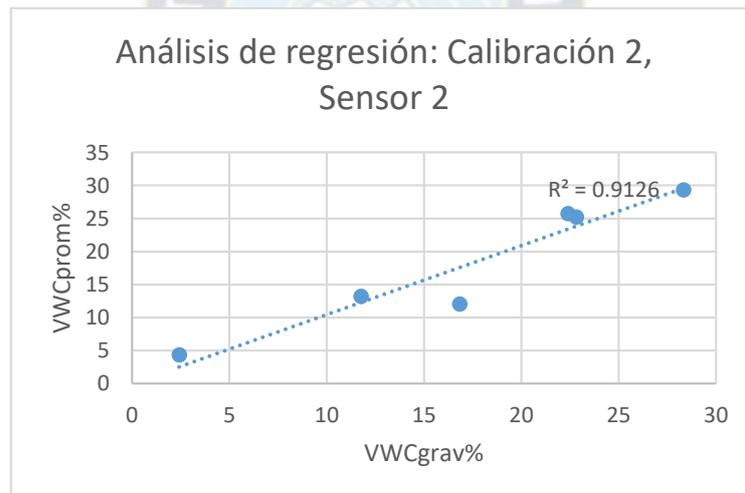
4.2.1.1.2. Sensor 2.

Figura 4-38: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 2



Fuente: Elaboración propia.

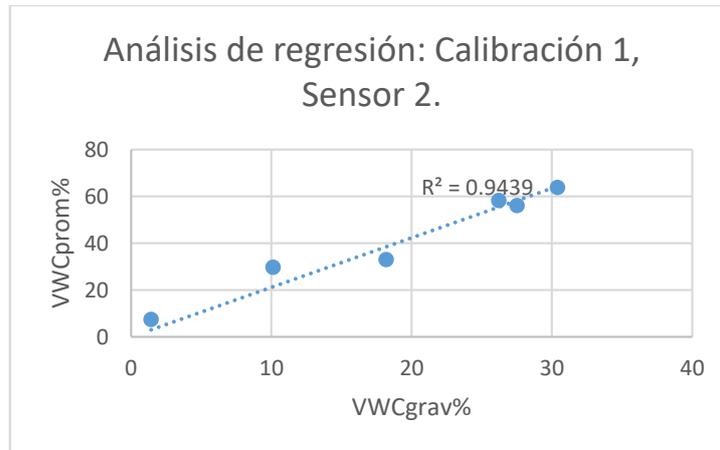
Figura 4-39: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 2.



Fuente: Elaboración propia.

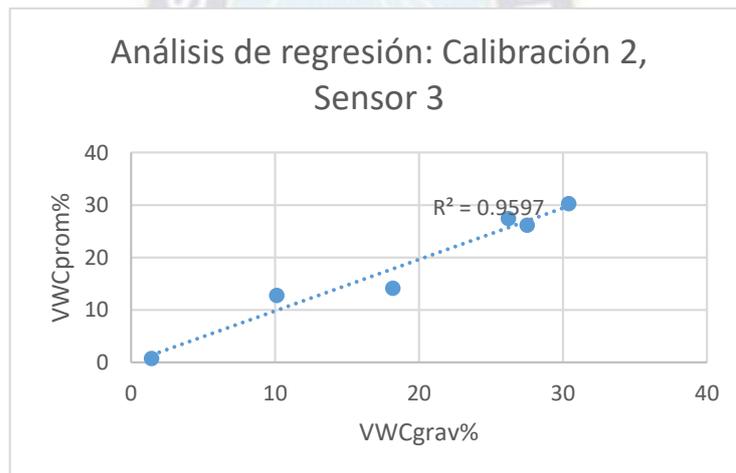
4.2.1.1.3. Sensor 3.

Figura 4-40: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 3



Fuente: Elaboración propia.

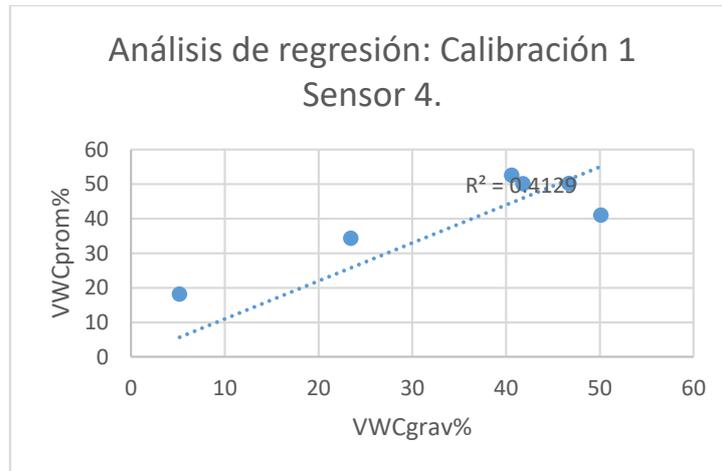
Figura 4-41: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 3



Fuente: Elaboración propia.

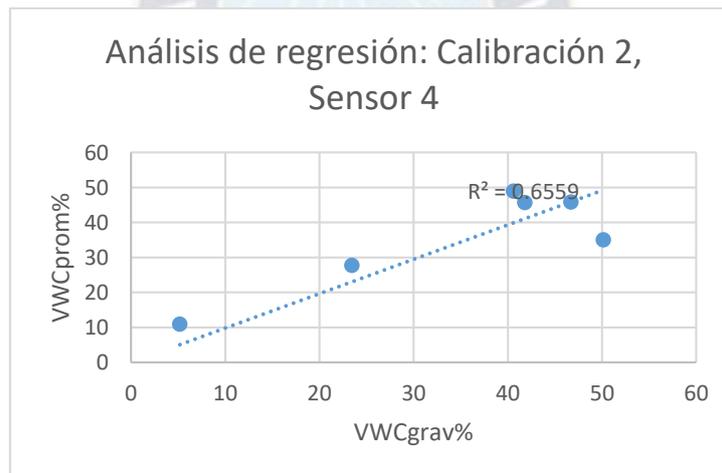
4.2.1.1.4. Sensor 4.

Figura 4-42: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 4



Fuente: Elaboración propia.

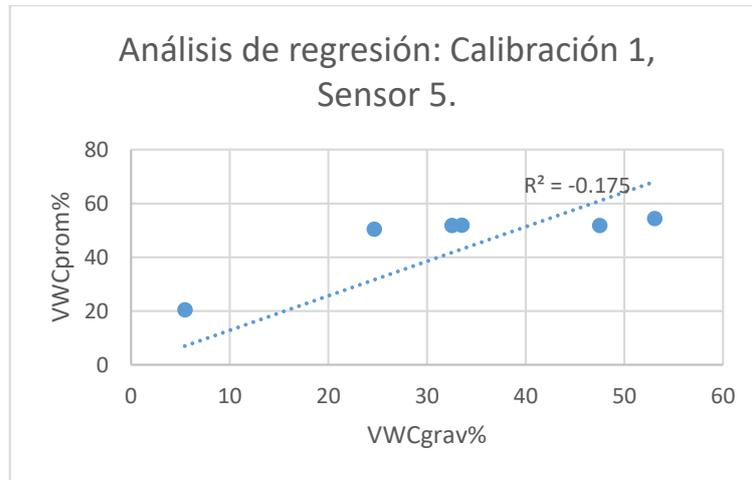
Figura 4-43: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 4



Fuente: Elaboración propia.

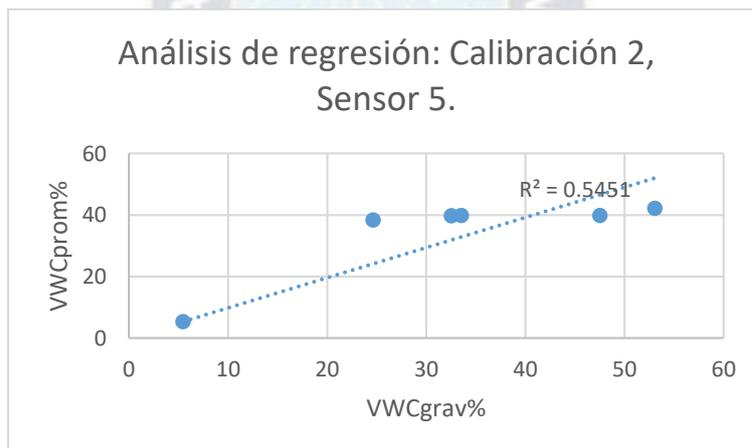
4.2.1.1.5. Sensor 5.

Figura 4-44: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 5



Fuente: Elaboración propia.

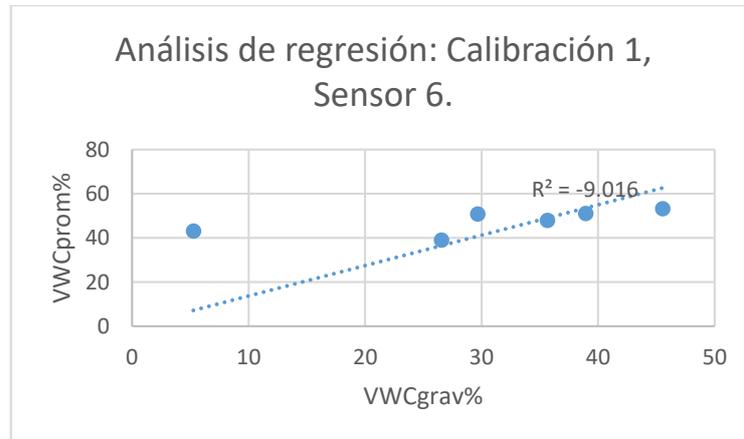
Figura 4-45: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 5.



Fuente: Elaboración propia.

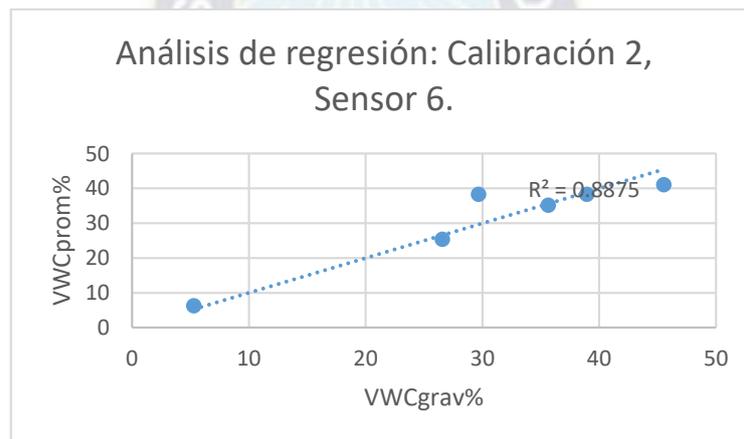
4.2.1.1.6. Sensor 6.

Figura 4-46: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 6



Fuente: Elaboración propia.

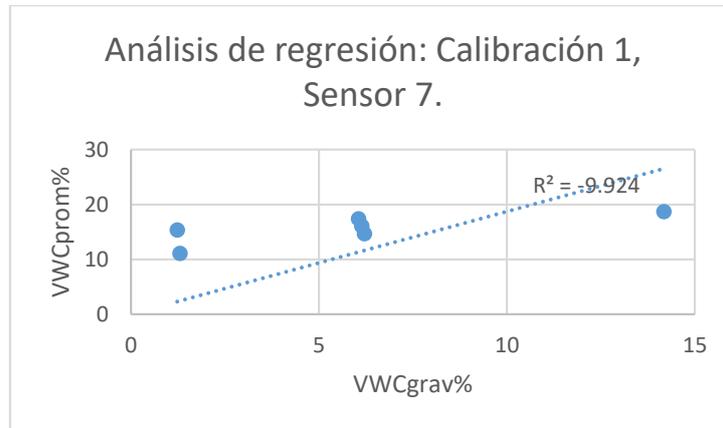
Figura 4-47: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 6.



Fuente: Elaboración propia.

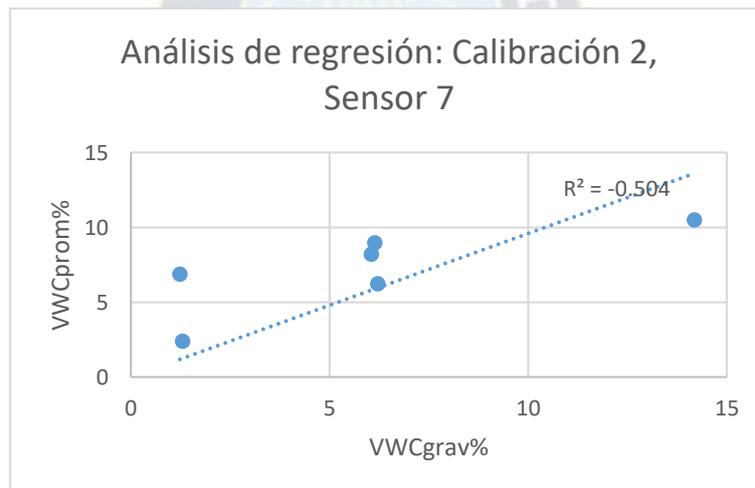
4.2.1.1.7. Sensor 7.

Figura 4-48: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 7



Fuente: Elaboración propia.

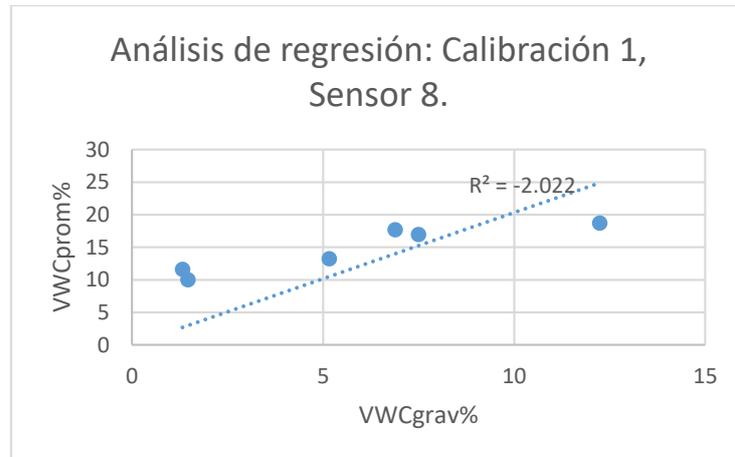
Figura 4-49: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 7



Fuente: Elaboración propia.

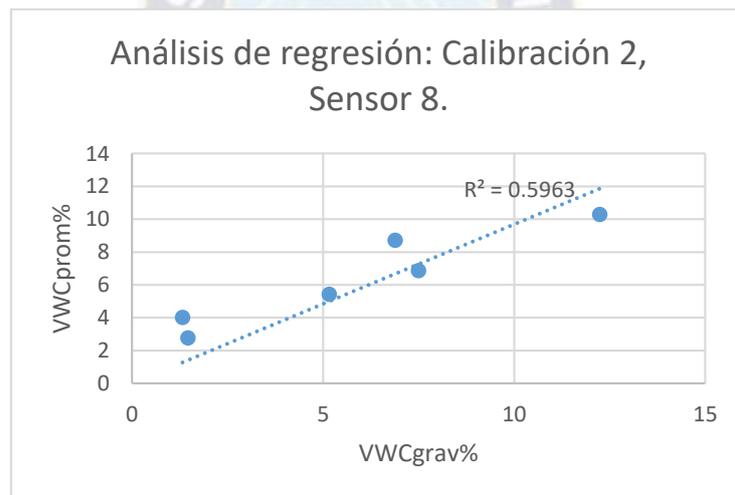
4.2.1.1.8. Sensor 8.

Figura 4-50: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 8



Fuente: Elaboración propia.

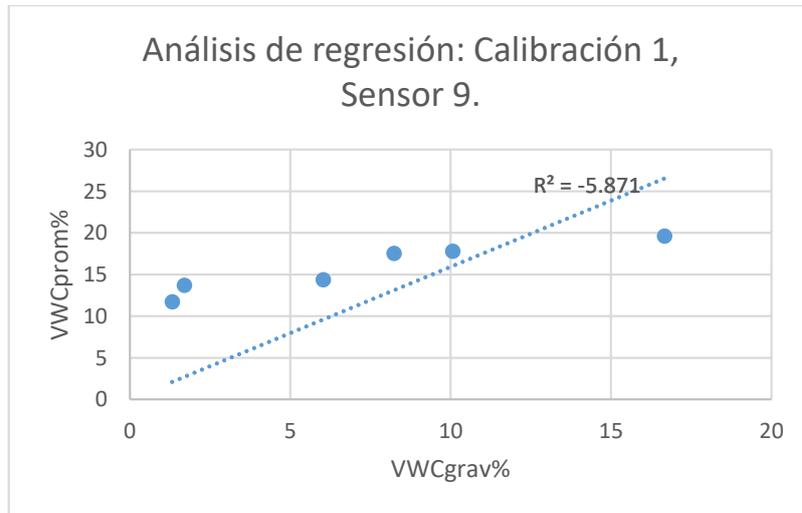
Figura 4-51: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 8



Fuente: Elaboración propia.

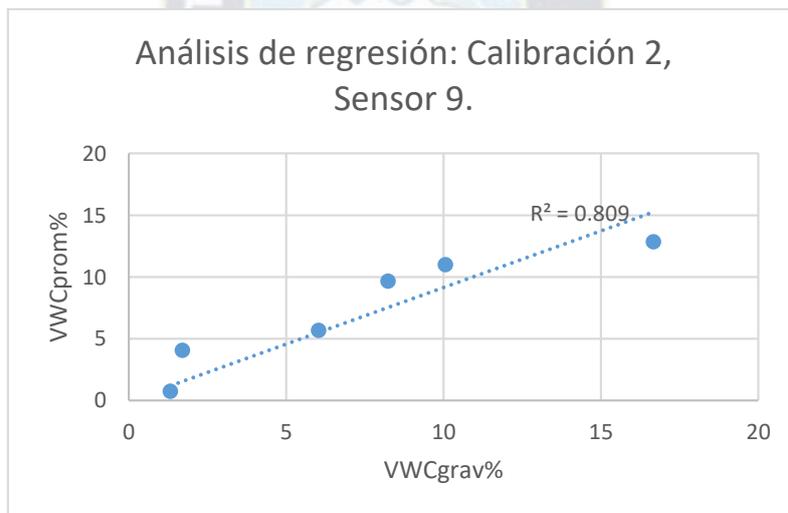
4.2.1.1.9. Sensor 9.

Figura 4-52: Análisis de regresión calibración 1: Sensor 9



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-53: Análisis de regresión calibración 2: Sensor 9

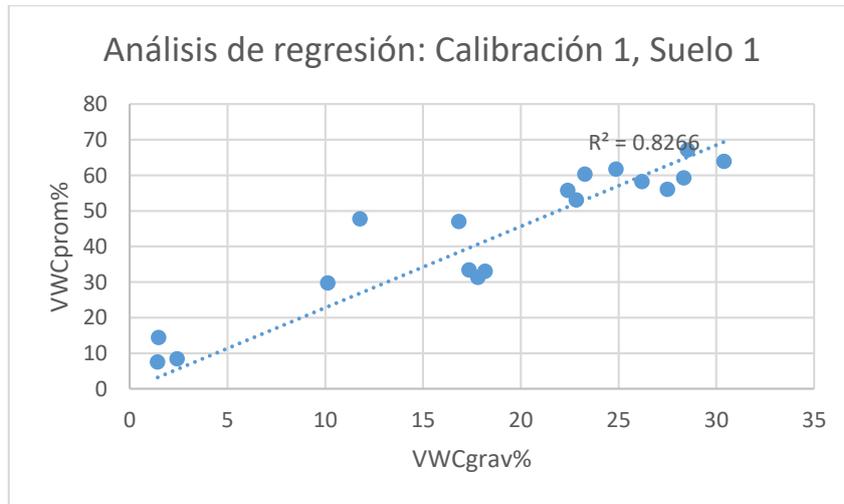


Fuente: Elaboración propia.

4.2.1.2. Para tipo de suelo.

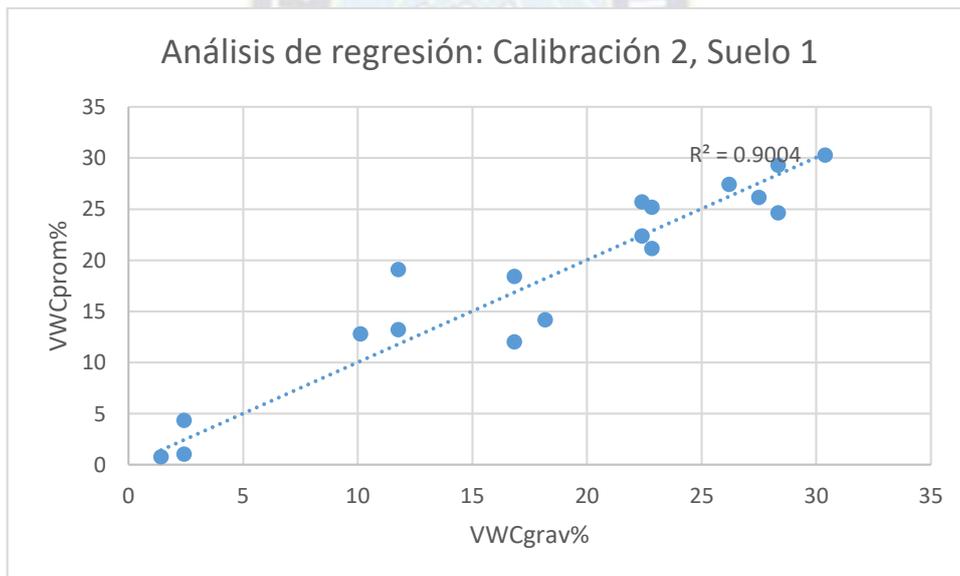
4.2.1.2.1. Suelo 1.

Figura 4-54: Análisis de regresión calibración 1: Suelo 1.



Fuente: Elaboración propia.

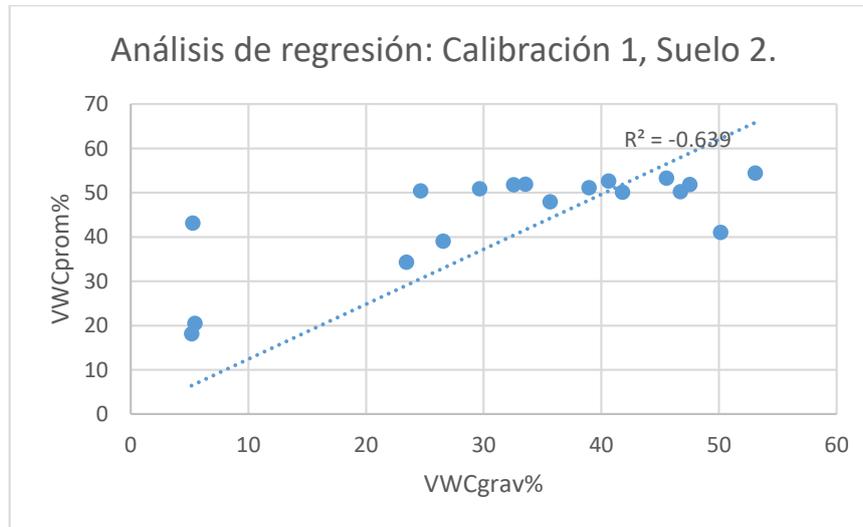
Figura 4-55: Análisis de regresión calibración 2: Suelo 1.



Fuente: Elaboración propia.

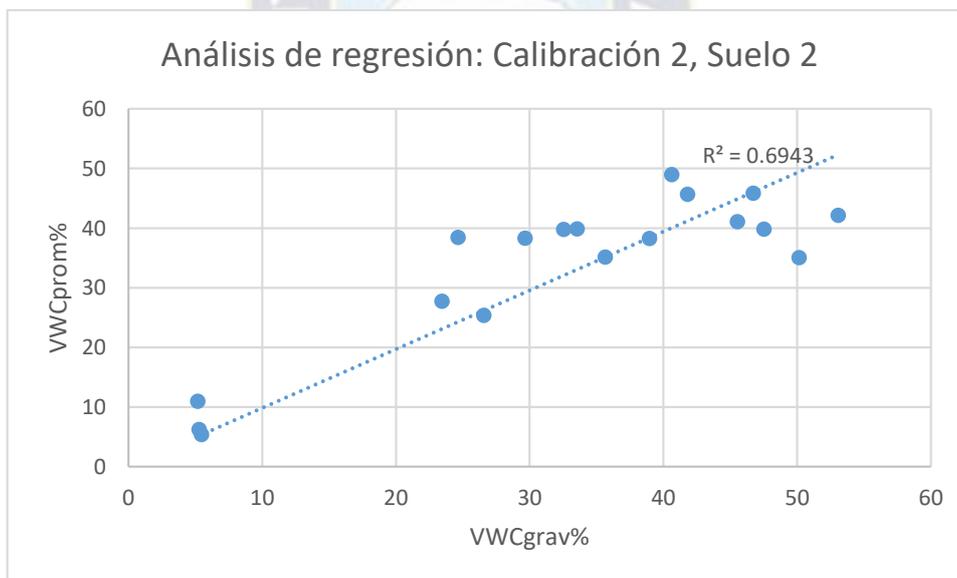
4.2.1.2.2. Suelo 2.

Figura 4-56: Análisis de regresión calibración 1: Suelo 2.



Fuente: Elaboración propia.

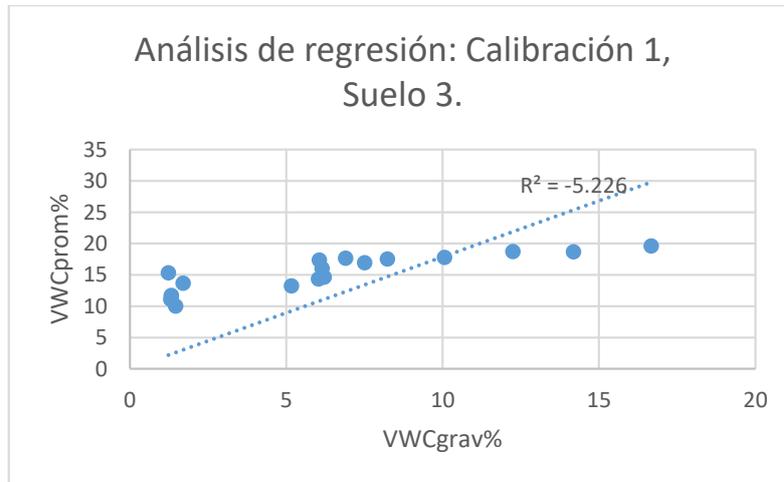
Figura 4-57: Análisis de regresión calibración 2: Suelo 2.



Fuente: Elaboración propia.

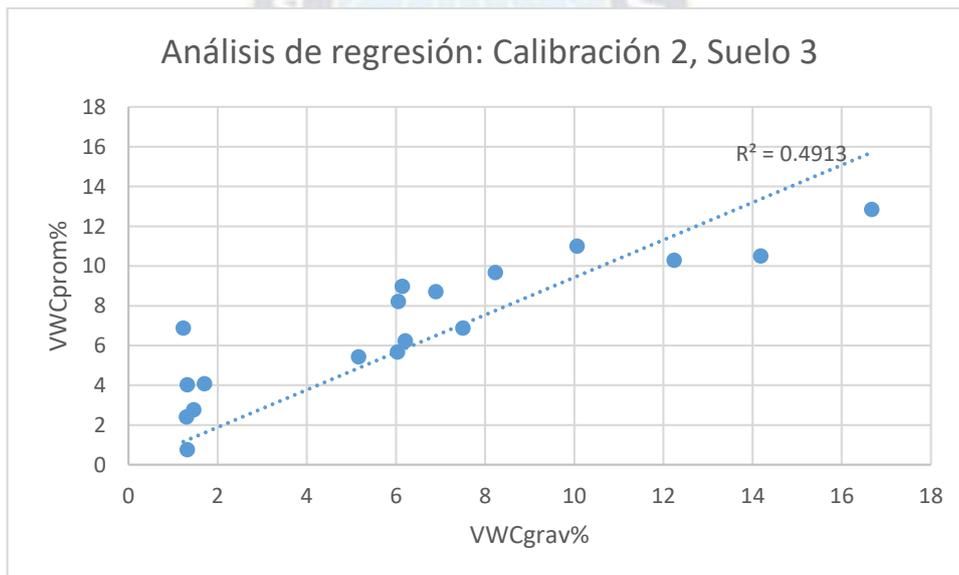
4.2.1.2.3. Suelo 3.

Figura 4-58: Análisis de regresión calibración 1: Suelo 3.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-59: Análisis de regresión calibración 2: Suelo 3.



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2. Diagrama de Bland-Altman.

Bland-Altman es un método muy recomendable para comparar dos métodos de medición, este método consiste un gráfico comparativo con respecto a una misma variable cuantitativa. Del diagrama se toma en cuenta los siguientes criterios.

- Promedio de la diferencia: Esta está representada con una línea central y expresa el sesgo sistemático entre los dos métodos, siendo lo ideal un valor próximo a cero.
- Dispersión de los puntos: En un estado ideal este debería mantenerse uniformemente, sin embargo, si se observa una tendencia ascendente o descendente, sugiere que la discrepancia entre los métodos de medición varía con el tamaño de cada medida.

Por ello para tener una mejor perspectiva del comportamiento del sistema, se lo realizará en 2 enfoques: por sensor y por tipo de suelo.

4.2.2.1. Para cada sensor.

Con el fin de ampliar la observación de los resultados, se obtendrá los diagramas de Bland-Altman de forma individual, es decir, para cada sensor en relación a la maceta donde se recolectó la muestra para la obtención de VWC por método gravimétrico; y por tipo de suelo,

4.2.2.1.1. Sensor 1.

Tabla 4-56: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 1.

N° de muestra	VWC_{prom}	VWC_{grav}	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$
1	8,46	2,42	-6,04	5,44
2	47,02	16,83	-30,19	31,93
3	47,77	11,77	-36,00	29,77
4	53,08	22,83	-30,25	37,96
5	55,78	22,40	-33,38	39,09
6	59,30	28,34	-30,96	43,82
Promedio de la diferencia			-27,8	

Fuente: Elaboración propia.

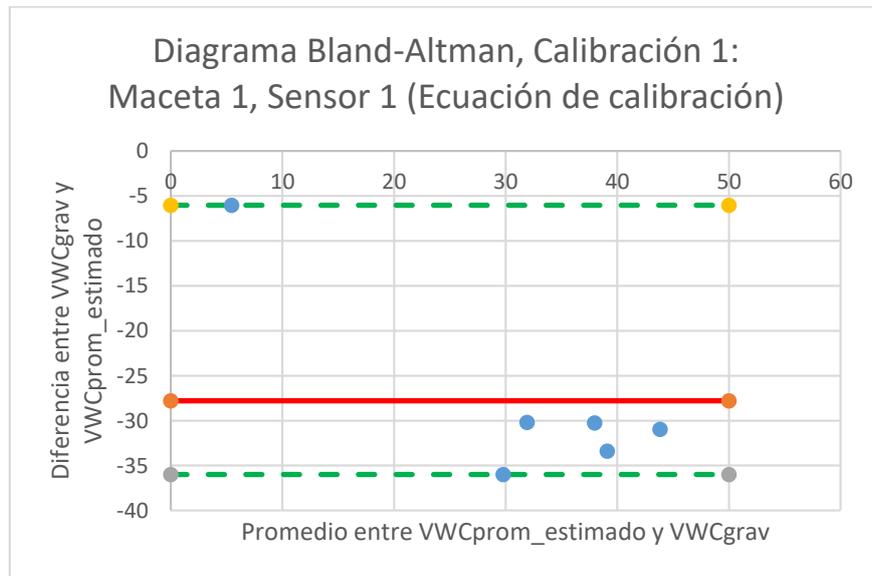
Tabla 4-57: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 1.

N° de muestra	$VWC_{prom}\%$	$VWC_{grav}\%$	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{prom}\%$ y $VWC_{grav}\%$
1	1,05	2,42	1,37	1,74
2	18,43	16,83	-1,60	17,63

3	19,12	11,77	-7,35	15,45
4	21,16	22,83	1,67	22
5	22,4	22,4	0	22,4
6	24,65	28,34	3,69	26,5
Promedio de la diferencia			-0,37	

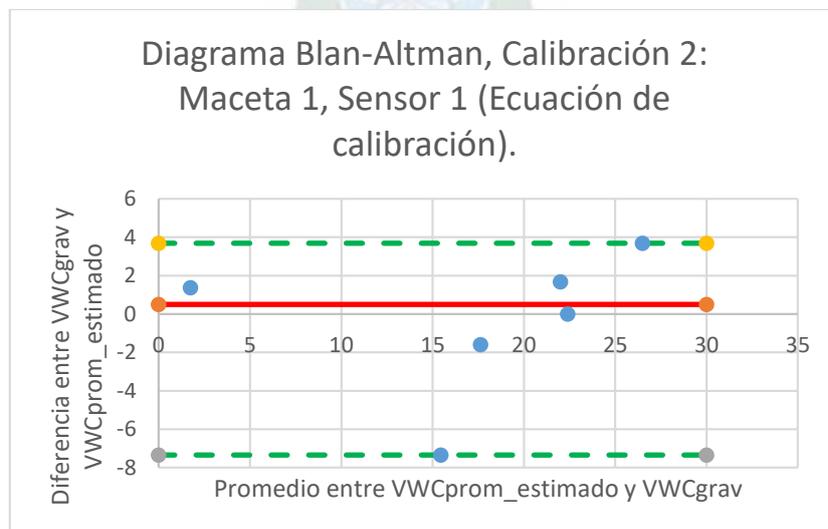
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-60: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 1, Sensor 1 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-61: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 1, Sensor 1 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1.2. Sensor 2.

Tabla 4-58: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 2.

N° de muestra	VWC_{prom}	VWC_{grav}	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$
1	14,49	1,48	-13,01	7,99
2	31,37	17,80	-13,57	24,59
3	33,48	17,35	-16,13	25,42
4	60,36	23,27	-37,09	41,82
5	61,75	24,87	-36,88	43,31
6	67,20	28,52	-38,68	47,86
Promedio de la diferencia			-25,89	

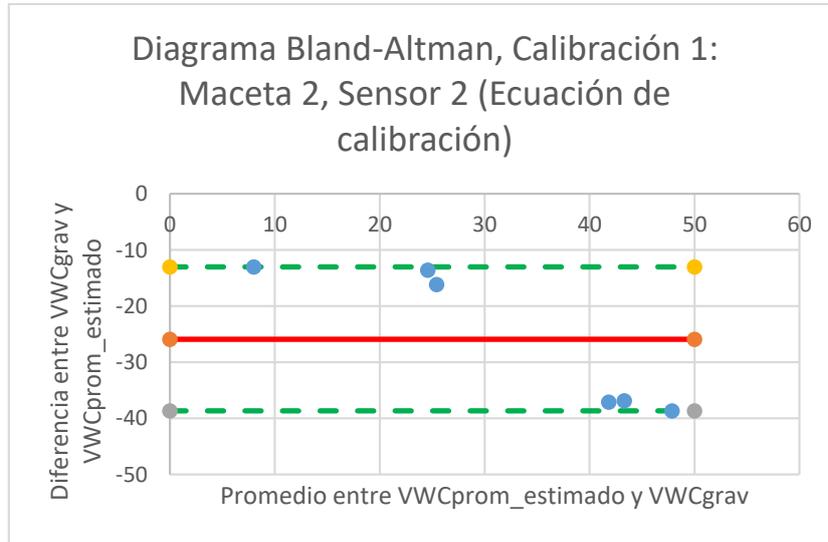
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-59: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 2.

N° de muestra	$VWC_{prom}\%$	$VWC_{grav}\%$	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{prom}\%$ y $VWC_{grav}\%$
1	4,35	2,42	-1,93	3,39
2	12,04	16,83	4,79	14,44
3	13,24	11,77	-1,47	12,51
4	25,21	22,83	-2,38	24,02
5	25,73	22,40	-3,33	24,07
6	29,32	28,34	-0,98	28,83
Promedio de la diferencia			-0,88	

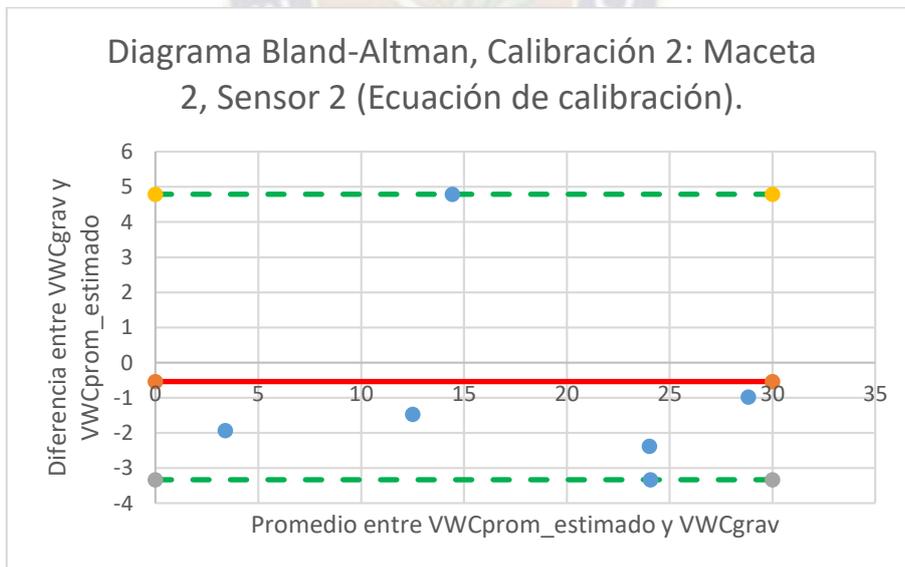
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-62: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 2, Sensor 2 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-63: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 2, Sensor 2 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1.3. Sensor 2.

Tabla 4-60: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 3.

N° de muestra	VWC_{prom}	VWC_{grav}	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$
1	7,56	1,42	-6,14	4,49
2	33,09	18,18	-14,91	25,64
3	29,79	10,12	-19,67	19,96
4	56,12	27,50	-28,62	41,81
5	58,28	26,20	-32,08	42,24
6	63,93	30,39	-33,54	47,16
Promedio de la diferencia			-22,49	

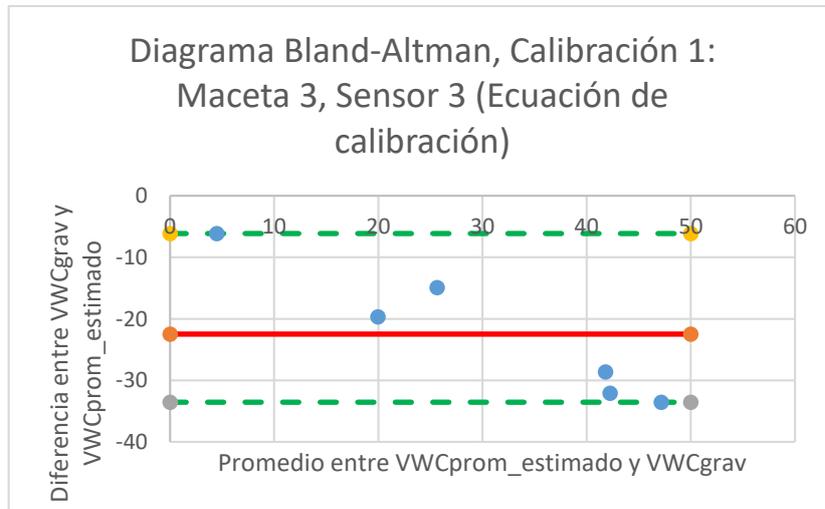
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-61: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 3.

N° de muestra	$VWC_{prom}\%$	$VWC_{grav}\%$	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{prom}\%$ y $VWC_{grav}\%$
1	0,80	1,42	0,62	1,11
2	14,18	18,18	4,00	16,18
3	12,80	10,12	-2,68	11,46
4	26,15	27,50	1,35	26,83
5	27,43	26,20	-1,23	26,82
6	30,29	30,39	0,10	30,34
Promedio de la diferencia			0,36	

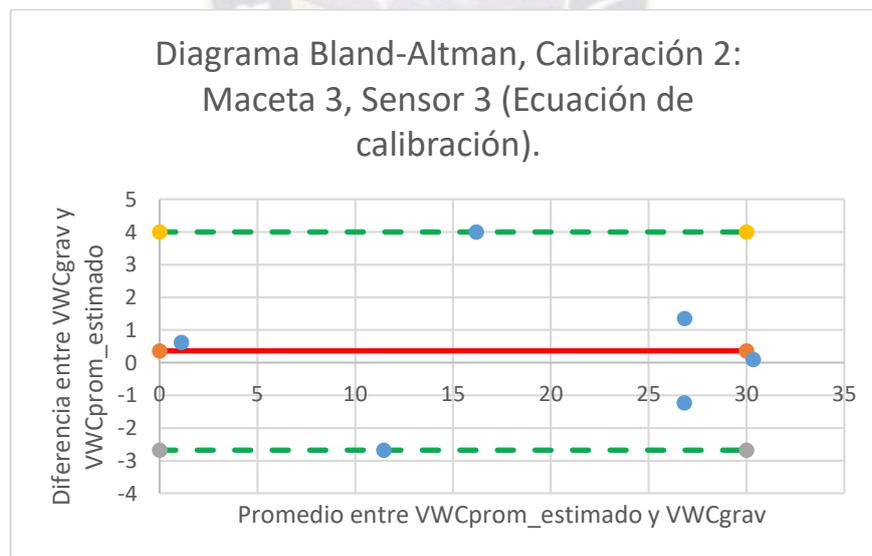
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-64: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 3, Sensor 3 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-65: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 1, Sensor 3 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1.4. Sensor 4.

Tabla 4-62: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 4.

N° de muestra	VWC_{prom}	VWC_{grav}	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$
1	18,17	5,17	-13,00	11,67
2	34,36	23,44	-10,92	28,90
3	41,05	50,14	9,09	45,60
4	50,13	41,80	-8,33	45,97
5	50,23	46,71	-3,52	48,47
6	52,65	40,61	-12,04	46,63
Promedio de la diferencia			-6,45	

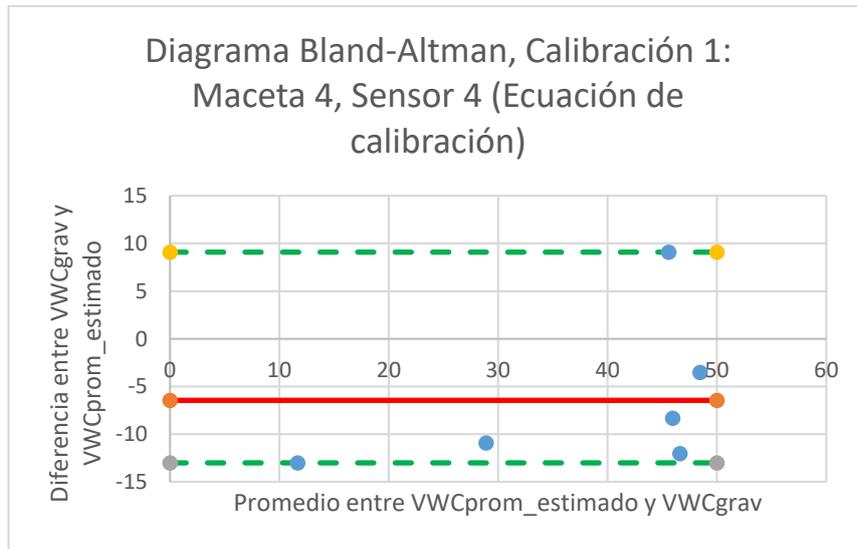
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-63: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 4.

N° de muestra	$VWC_{prom}\%$	$VWC_{grav}\%$	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{prom}\%$ y $VWC_{grav}\%$
1	11,01	5,17	-5,84	8,09
2	27,77	23,44	-4,33	25,61
3	35,10	50,14	15,04	42,62
4	45,71	41,80	-3,91	43,76
5	45,89	46,71	0,82	46,30
6	49,00	40,61	-8,39	44,81
Promedio de la diferencia			-1,10	

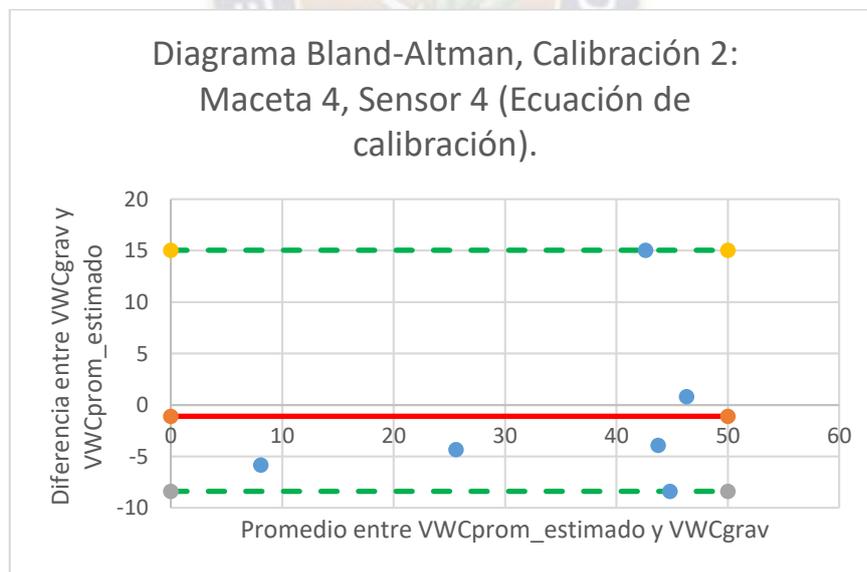
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-66: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 4, Sensor 4 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-67: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 1, Sensor 4 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1.5. Sensor 5.

Tabla 4-64: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 5.

N° de muestra	VWC_{prom}	VWC_{grav}	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$
1	20,53	5,45	-15,08	12,99
2	51,80	32,54	-19,26	42,17
3	50,42	24,64	-25,78	37,53
4	51,86	47,51	-4,35	49,69
5	51,91	33,54	-18,37	42,73
6	54,46	53,08	-1,38	53,77
Promedio de la diferencia			-14,04	

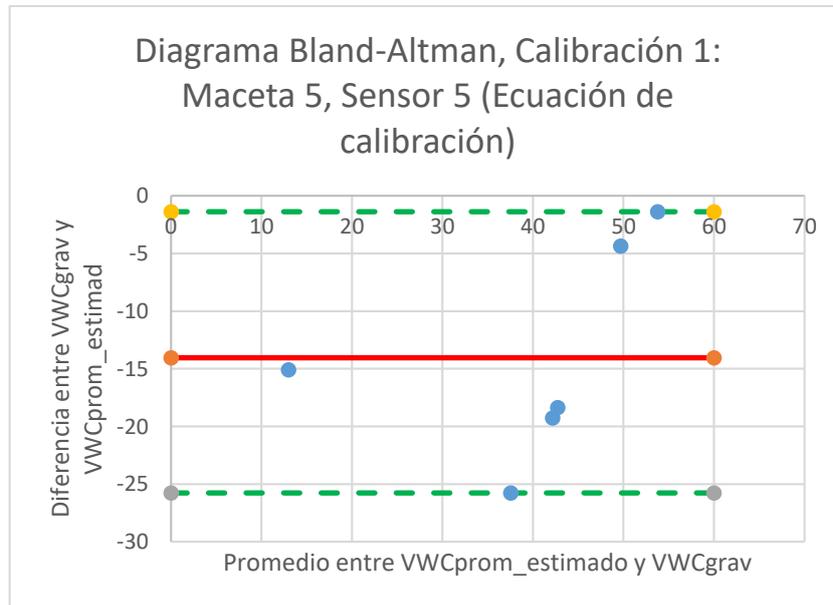
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-65: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 5.

N° de muestra	$VWC_{prom}\%$	$VWC_{grav}\%$	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{prom}\%$ y $VWC_{grav}\%$
1	5,41	5,45	0,04	5,43
2	39,79	32,54	-7,25	36,17
3	38,45	24,64	-13,81	31,55
4	39,86	47,51	7,65	43,69
5	39,89	33,54	-6,35	36,72
6	42,19	53,08	10,89	47,64
Promedio de la diferencia			-1,47	

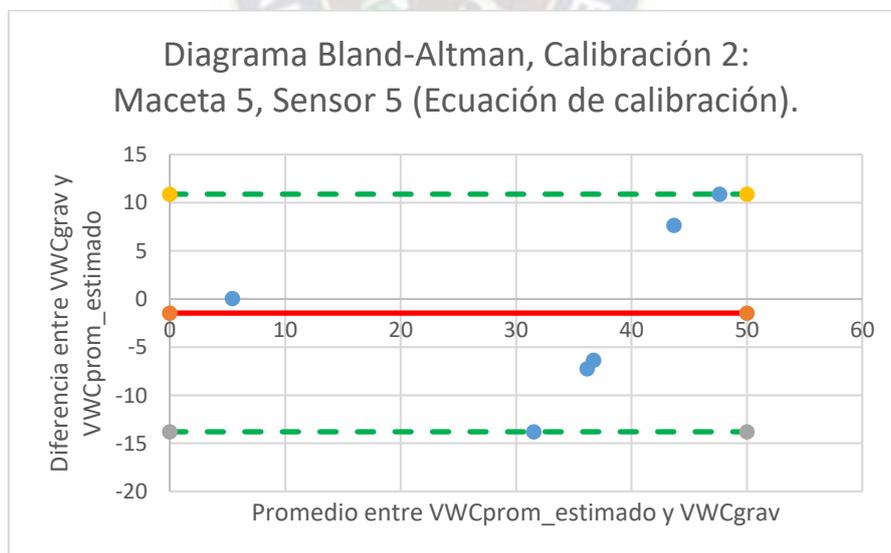
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-68: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 5, Sensor 5 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-69: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 5, Sensor 5 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1.6. Sensor 6.

Tabla 4-66: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 6.

N° de muestra	VWC_{prom}	VWC_{grav}	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$
1	43,16	5,27	-37,89	24,22
2	47,95	35,64	-12,31	41,80
3	39,07	26,56	-12,51	32,82
4	51,14	38,95	-12,19	45,05
5	50,92	29,66	-21,26	40,29
6	53,33	45,54	-7,79	49,44
Promedio de la diferencia			-17,33	

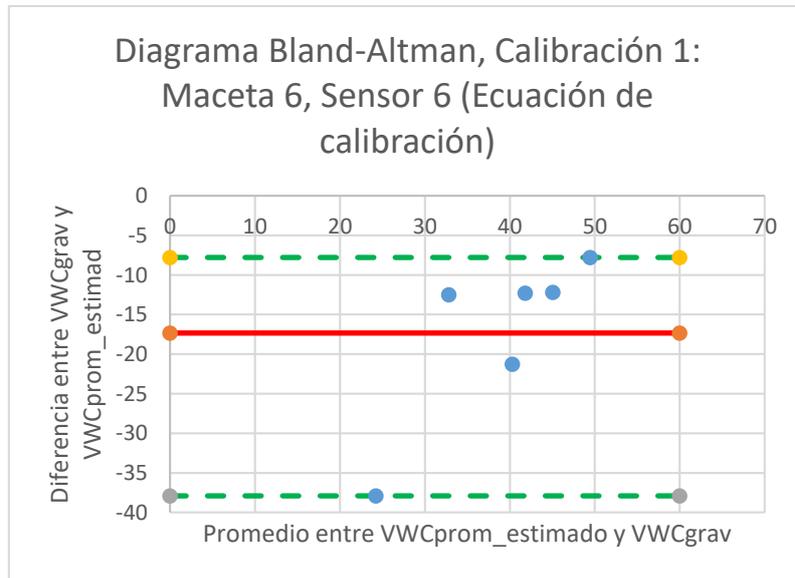
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-67: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 6.

N° de muestra	$VWC_{prom}\%$	$VWC_{grav}\%$	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{prom}\%$ y $VWC_{grav}\%$
1	6,27	5,27	-1,00	5,77
2	35,18	35,64	0,46	35,41
3	25,42	26,56	1,14	25,99
4	38,29	38,95	0,66	38,62
5	38,33	29,66	-8,67	34,00
6	41,11	45,54	4,43	43,33
Promedio de la diferencia			-0,50	

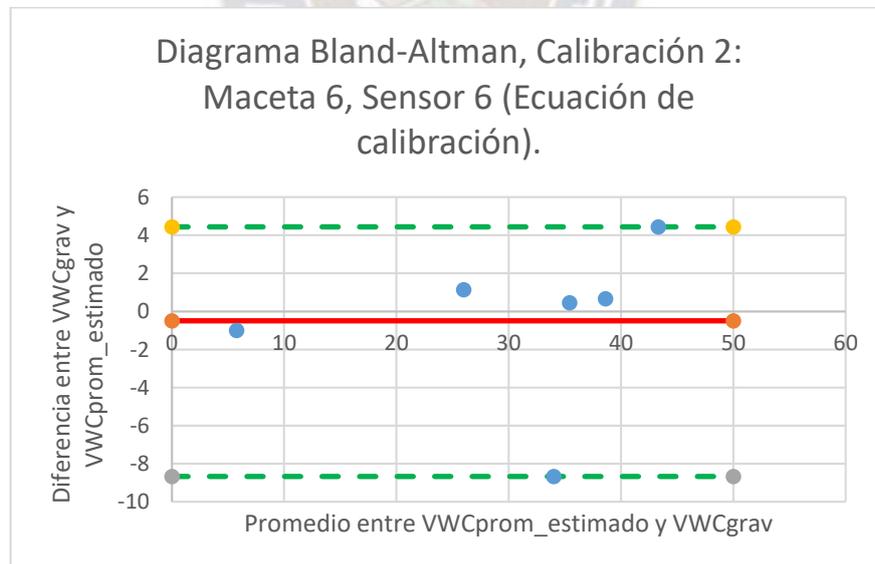
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-70: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 6, Sensor 6 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-71: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 6, Sensor 6 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1.7. Sensor 7.

Tabla 4-68: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 7.

N° de muestra	VWC_{prom}	VWC_{grav}	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$
1	11,11	1,30	-9,81	6,21
2	15,36	1,23	-14,13	8,30
3	14,68	6,21	-8,47	10,45
4	16,09	6,14	-9,95	11,12
5	17,40	6,05	-11,35	11,73
6	18,72	14,18	-4,54	16,45
Promedio de la diferencia			-9,71	

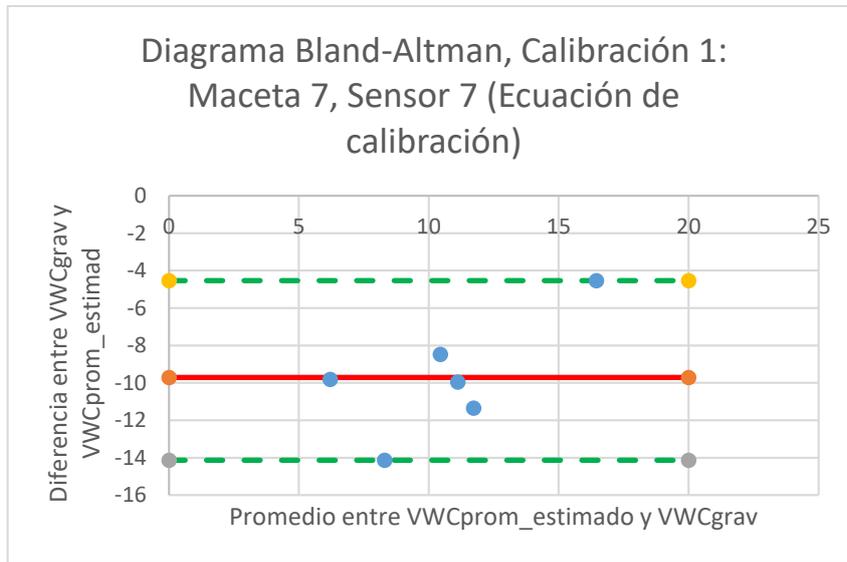
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-69: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 7.

N° de muestra	$VWC_{prom}\%$	$VWC_{grav}\%$	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{prom}\%$ y $VWC_{grav}\%$
1	2,41	1,3	-1,11	1,86
2	6,88	1,23	-5,65	4,06
3	6,24	6,21	-0,03	6,23
4	8,98	6,14	-2,84	7,56
5	8,22	6,05	-2,17	7,14
6	10,51	14,18	3,67	12,35
Promedio de la diferencia			-1,36	

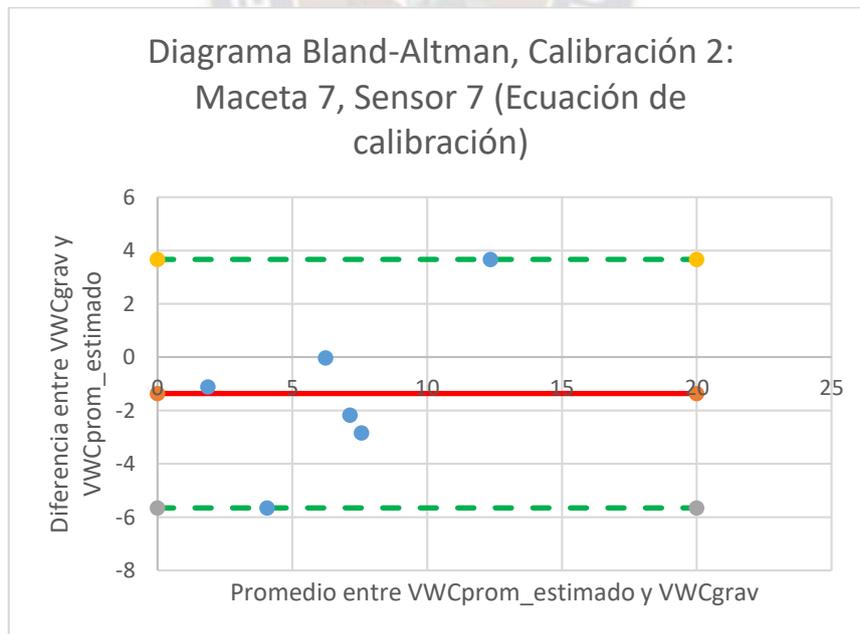
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-72: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 7, Sensor 7 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-73: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 7, Sensor 7 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1.8. Sensor 8.

Tabla 4-70: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 8.

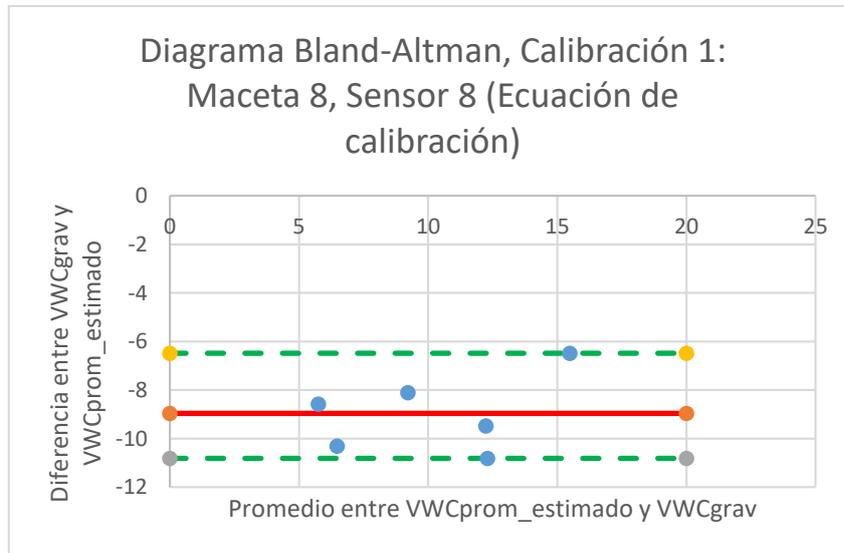
N° de muestra	VWC_{prom}	VWC_{grav}	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$
1	10,04	1,46	-8,58	5,75
2	11,63	1,32	-10,31	6,48
3	13,27	5,16	-8,11	9,22
4	16,98	7,50	-9,48	12,24
5	17,70	6,89	-10,81	12,30
6	18,73	12,24	-6,49	15,49
Promedio de la diferencia			-8,96	

Fuente: Elaboración propia.

N° de muestra	$VWC_{prom}\%$	$VWC_{grav}\%$	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{prom}\%$ y $VWC_{grav}\%$
1	2,77	1,46	-1,31	2,12
2	4,03	1,32	-2,71	2,68
3	5,44	5,16	-0,28	5,30
4	6,88	7,50	0,62	7,19
5	8,72	6,89	-1,83	7,81
6	10,30	12,24	1,94	11,27
Promedio de la diferencia			-0,6	

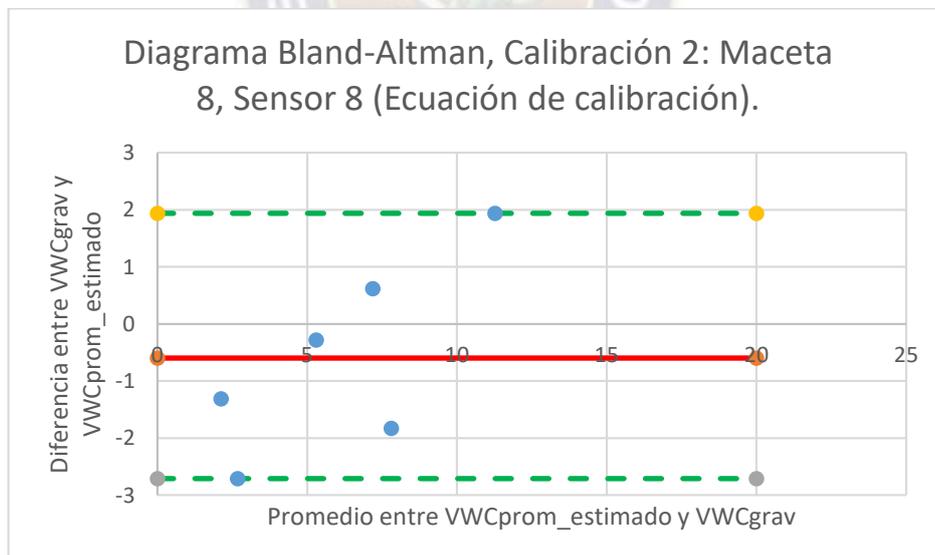
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-74: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 8, Sensor 8 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-75: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 8, Sensor 8 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.2.1.9. Sensor 9.

Tabla 4-71: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico, ecuación de calibración (calibración 1) del Sensor 9.

Nº de muestra	VWC_{prom}	VWC_{grav}	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$
1	11,73	1,32	-10,41	6,53
2	13,71	1,70	-12,01	7,71
3	14,39	6,03	-8,36	10,21
4	17,56	8,23	-9,33	12,90
5	17,82	10,06	-7,76	13,94
6	19,63	16,67	-2,96	18,15
Promedio de la diferencia			-8,47	

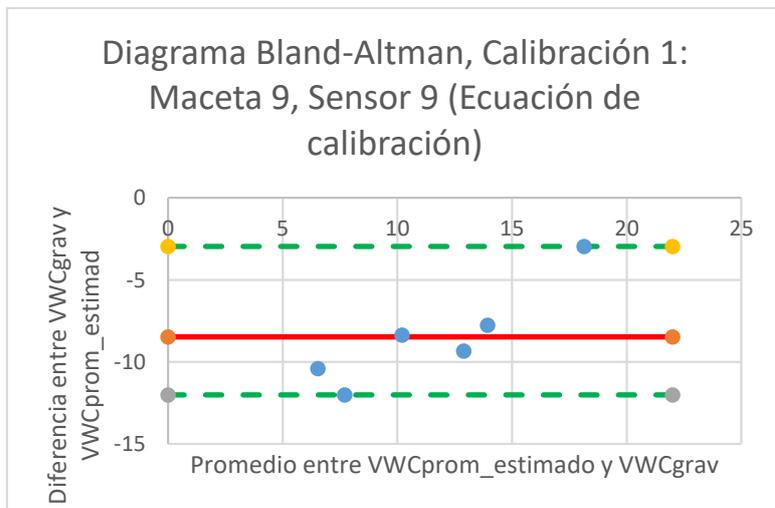
Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-72: Diferencia entre medidas obtenidas por método gravimétrico y ecuación de calibración (calibración 2) del Sensor 9.

Nº de muestra	$VWC_{prom}\%$	$VWC_{grav}\%$	Diferencia entre $VWC_{grav}\%$ y $VWC_{prom}\%$	Promedio entre $VWC_{prom}\%$ y $VWC_{grav}\%$
1	0,77	1,32	0,55	1,04
2	4,08	1,70	-2,38	2,89
3	5,68	6,03	0,35	5,86
4	9,68	8,23	-1,45	8,96
5	11	10,06	-0,94	10,53
6	12,85	16,67	3,82	14,76
Promedio de la diferencia			-0,01	

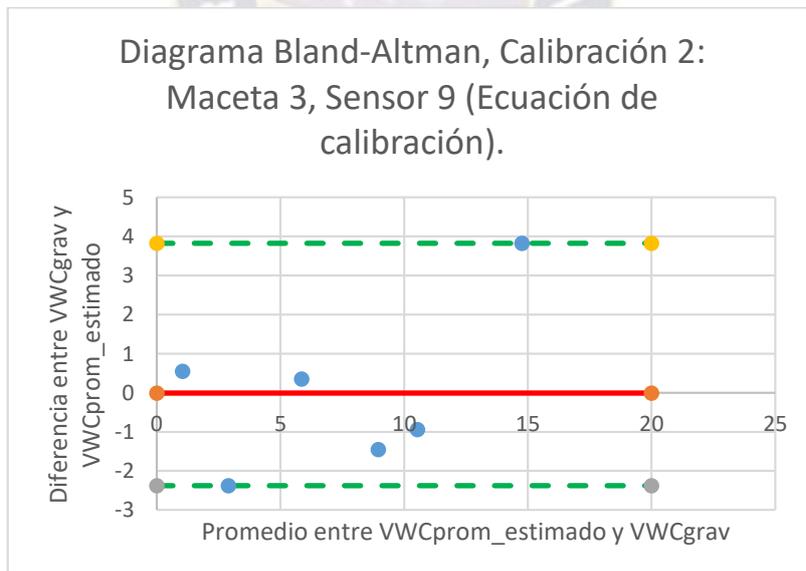
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-76: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 1: Maceta 9, Sensor 9 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-77: Diagrama de Bland-Altman, Calibración 2: Maceta 1, Sensor 9 (Ecuación de calibración).



Fuente: Elaboración propia.

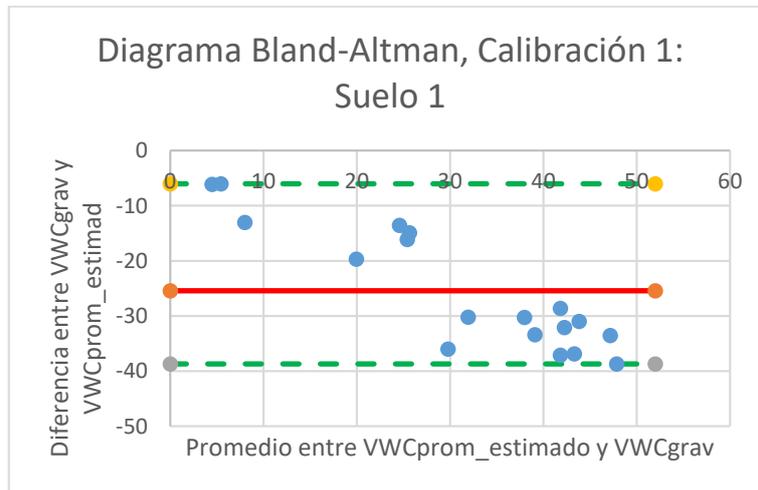
4.2.2.2. Para cada tipo de Suelo.

Luego de observar los diagramas de Bland-Altman para cada sensor, ahora se realizarán los mismos diagramas, pero para cada tipo de suelo, para realizar una observación de forma general para los mismos.

4.2.2.2.1. Suelo 1.

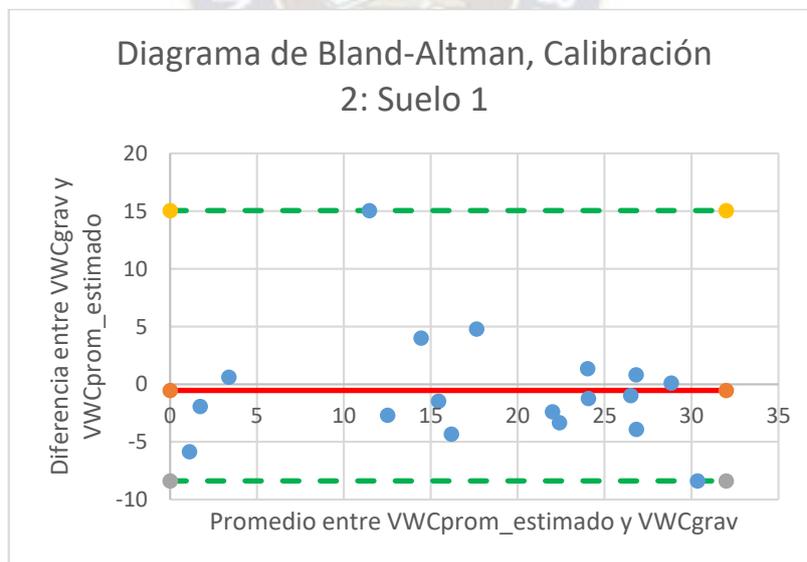
Primeramente, se observará el diagrama de Bland-Altman para el Suelo 1.

Figura 4-78: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 1 (Calibración 1).



Fuente: Elaboración propia.

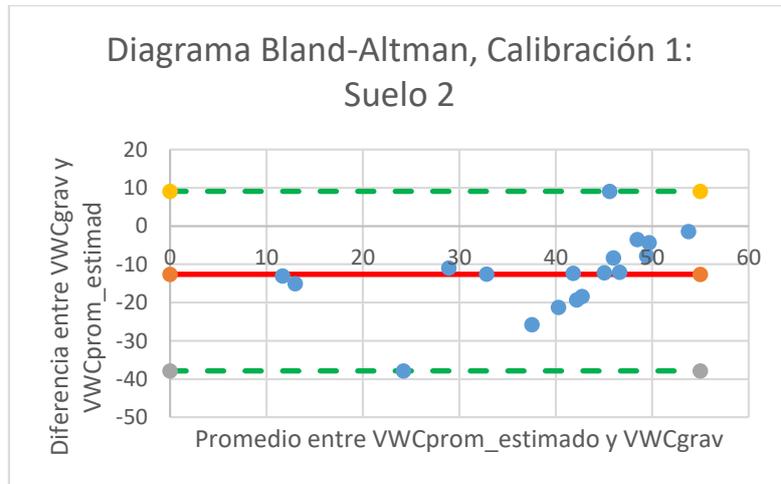
Figura 4-79: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 1 (Calibración 2).



Fuente: Elaboración propia.

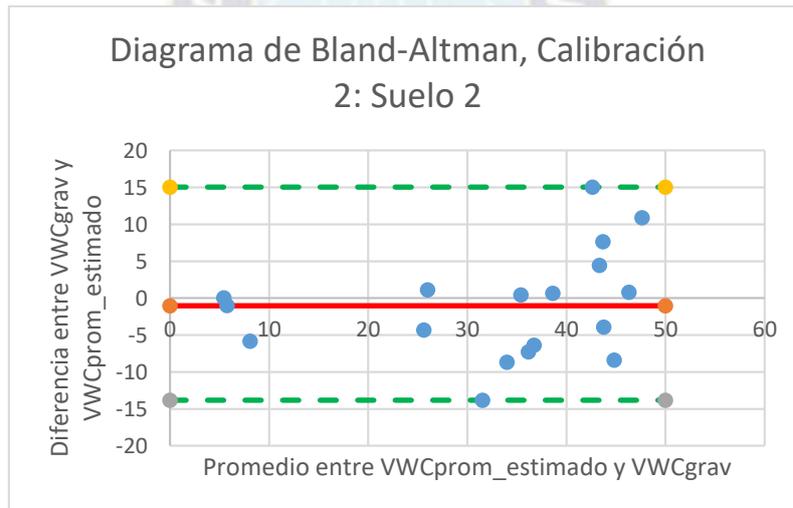
4.2.2.2.2. Suelo 2.

Figura 4-80: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 2 (Calibración 1).



Fuente: Elaboración propia.

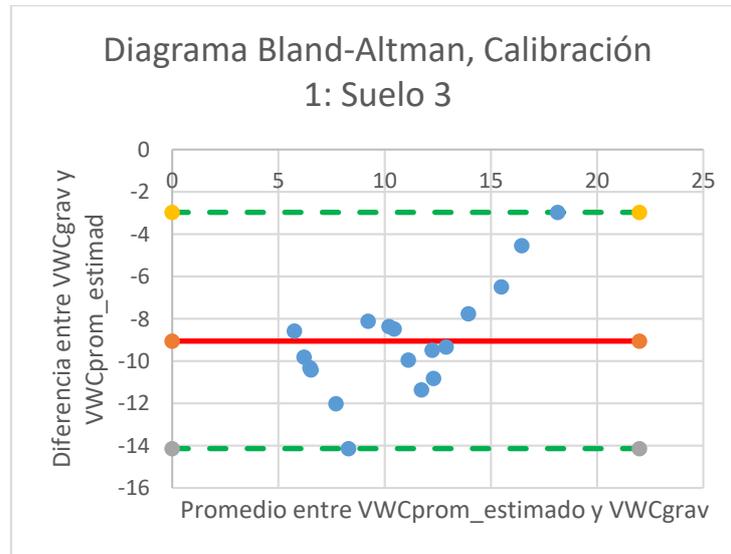
Figura 4-81: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 2 (Calibración 2).



Fuente: Elaboración propia.

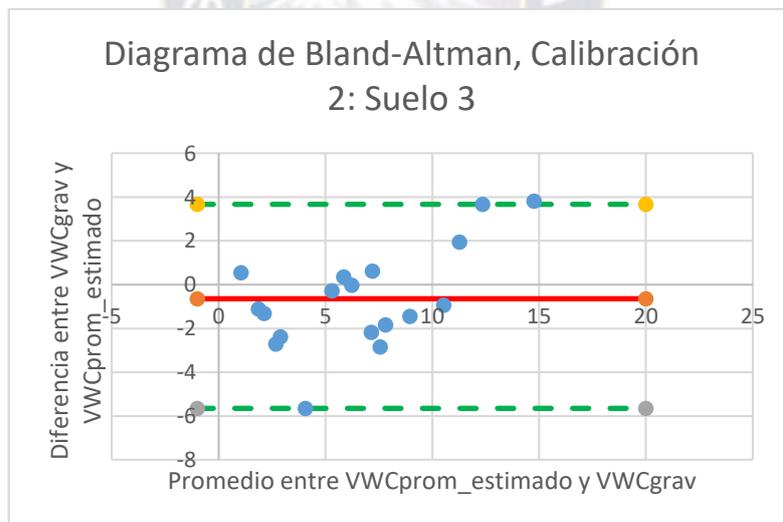
4.2.2.2.3. Suelo 3.

Figura 4-82: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 3 (Calibración 1).



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-83: Diagrama de Bland-Altman: Suelo 3 (Calibración 2).



Fuente: Elaboración propia.

4.2.3. Prueba t.

A continuación, se muestra las pruebas t para cada sensor, con el fin de observar si existe alguna significancia con respecto a los valores obtenidos, para ello se tomará en cuenta los siguientes aspectos de las tablas:

- Media: Si las medias entre los métodos de medición similares, los métodos tienen una buena aproximación.
- Varianza: Es una medida de la dispersión de los datos, siendo lo ideal que ambos sean similares.
- Estadístico t: Un valor cercano a 0 sugiere que las medidas de los 2 grupos son muy similares.
- $P(t \leq T)$ dos colas: Un valor menor a 0,05 indica que existe una diferencia significativa entre las medidas.

El estadístico t se realizó mediante la herramienta de análisis de datos de Excel, observando los resultados para cada sensor y tipo de suelo.

4.2.3.1. Para cada sensor.

4.2.3.1.1. Sensor 1.

Tabla 4-73: Prueba t para sensor 1 (Calibración 1).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	45,235	17,4316667
Varianza	346,51567	86,1169367
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	7	
Estadístico t	3,27425778	
$P(T \leq t)$ una cola	0,00679713	
Valor crítico de t (una cola)	1,89457861	
$P(T \leq t)$ dos colas	0,01359426	
Valor crítico de t (dos colas)	2,36462425	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-74: Prueba t para sensor 1 (Calibración 2).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	17,8016667	17,4316667
Varianza	72,4147767	86,1169367
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	0,07198123	
$P(T \leq t)$ una cola	0,47201808	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	

P(T<=t) dos colas	0,94403616
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1.2. Sensor 2.

Tabla 4-75: Prueba t para sensor 2 (Calibración 1).

	<i>VWCprom</i>	<i>VWCgrav</i>
Media	44,775	18,8816667
Varianza	451,67515	90,8698167
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	7	
Estadístico t	2,72298794	
P(T<=t) una cola	0,01481868	
Valor crítico de t (una cola)	1,89457861	
P(T<=t) dos colas	0,02963736	
Valor crítico de t (dos colas)	2,36462425	

Fuente: Excel

Tabla 4-76: Prueba t para sensor 2 (Calibración 2)

	<i>VWCprom</i>	<i>VWCgrav</i>
Media	18,315	17,4316667
Varianza	96,75715	86,1169367
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	0,16000154	
P(T<=t) una cola	0,43803281	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,87606562	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1.3. Sensor 3.

Tabla 4-77: Prueba t para sensor 3 (Calibración 1).

	<i>VWCprom</i>	<i>VWCgrav</i>
Media	41,4616667	18,9683333
Varianza	471,636937	128,479857
Observaciones	6	6

Diferencia hipotética de las medias	0
Grados de libertad	8
Estadístico t	2,24911444
P(T<=t) una cola	0,02732138
Valor crítico de t (una cola)	1,85954804
P(T<=t) dos colas	0,05464276
Valor crítico de t (dos colas)	2,30600414

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-78: Prueba t para sensor 3 (Calibración 2).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	18,6083333	18,9683333
Varianza	128,328697	128,479857
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	-0,05502669	
P(T<=t) una cola	0,47860053	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,95720107	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1.4. Sensor 4.

Tabla 4-79: Prueba t para sensor 4 (Calibración 1).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	41,0983333	34,645
Varianza	173,903057	293,35243
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t	0,73127802	
P(T<=t) una cola	0,24160661	
Valor crítico de t (una cola)	1,83311293	
P(T<=t) dos colas	0,48321323	
Valor crítico de t (dos colas)	2,26215716	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-80: Prueba t para sensor 4 (Calibración 2).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	35,7466667	34,645
Varianza	210,750827	293,35243
Observaciones	6	6

Diferencia hipotética de las medias	0
Grados de libertad	10
Estadístico t	0,12018938
P(T<=t) una cola	0,45335681
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112
P(T<=t) dos colas	0,90671362
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1.5. Sensor 5.

Tabla 4-81: Prueba t para sensor 5 (Calibración 1).

	<i>VWCprom</i>	<i>VWCgrav</i>
Media	46,83	32,7933333
Varianza	167,72064	288,577107
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t	1,60959068	
P(T<=t) una cola	0,07097395	
Valor crítico de t (una cola)	1,83311293	
P(T<=t) dos colas	0,14194789	
Valor crítico de t (dos colas)	2,26215716	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-82: Prueba t para sensor 5 (Calibración 2).

	<i>VWCprom</i>	<i>VWCgrav</i>
Media	34,265	32,7933333
Varianza	201,28023	288,577107
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	0,16287344	
P(T<=t) una cola	0,43693121	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,87386243	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1.6. Sensor 6.

Tabla 4-83: Prueba t para sensor 6 (Calibración 1).

	<i>VWCprom</i>	<i>VWCgrav</i>
--	----------------	----------------

Media	47,595	30,27
Varianza	29,79675	195,29768
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	6	
Estadístico t	2,82856716	
P(T<=t) una cola	0,01500711	
Valor crítico de t (una cola)	1,94318028	
P(T<=t) dos colas	0,03001422	
Valor crítico de t (dos colas)	2,44691185	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-84: Prueba t para sensor 6 (Calibración 2).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	30,7666667	30,27
Varianza	173,788027	195,29768
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	0,06332527	
P(T<=t) una cola	0,47537771	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,95075542	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1.7. Sensor 7.

Tabla 4-85: Prueba t para sensor 7 (Calibración 1).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	15,56	5,85166667
Varianza	6,8538	22,3378967
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	4,40139794	
P(T<=t) una cola	0,00114124	
Valor crítico de t (una cola)	1,85954804	
P(T<=t) dos colas	0,00228249	
Valor crítico de t (dos colas)	2,30600414	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-86: Prueba t para sensor 7 (Calibración 2).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	7,20666667	5,85166667
Varianza	7,82654667	22,3378967
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	0,60432041	
P(T<=t) una cola	0,28118646	
Valor crítico de t (una cola)	1,85954804	
P(T<=t) dos colas	0,56237291	
Valor crítico de t (dos colas)	2,30600414	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1.8. Sensor 8.

Tabla 4-87: Prueba t para sensor 8 (Calibración 1).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	14,725	5,76166667
Varianza	12,72419	16,9716967
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	4,02899774	
P(T<=t) una cola	0,00120169	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,00240338	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-88: Prueba t para sensor 8 (Calibración 2).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	6,35666667	5,76166667
Varianza	8,10538667	16,9716967
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	9	
Estadístico t	0,29104094	
P(T<=t) una cola	0,3888079	
Valor crítico de t (una cola)	1,83311293	
P(T<=t) dos colas	0,7776158	
Valor crítico de t (dos colas)	2,26215716	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.1.9. Sensor 9.

Tabla 4-89: Prueba t para sensor 9 (Calibración 1).

	<i>VWCprom</i>	<i>VWCgrav</i>
Media	15,8066667	7,335
Varianza	8,95354667	33,00107
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	8	
Estadístico t	3,20372039	
P(T<=t) una cola	0,00627102	
Valor crítico de t (una cola)	1,85954804	
P(T<=t) dos colas	0,01254204	
Valor crítico de t (dos colas)	2,30600414	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-90: Prueba t para sensor 9 (Calibración 2).

	<i>VWCprom</i>	<i>VWCgrav</i>
Media	7,34333333	7,335
Varianza	21,1558667	33,00107
Observaciones	6	6
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	10	
Estadístico t	0,00277375	
P(T<=t) una cola	0,49892071	
Valor crítico de t (una cola)	1,81246112	
P(T<=t) dos colas	0,99784142	
Valor crítico de t (dos colas)	2,22813885	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.2. Por tipo de suelo.

4.2.3.2.1. Suelo 1.

Tabla 4-91: Prueba t para Suelo 1 (Calibración 1).

	<i>VWCgrav</i>	<i>VWCprom</i>
Media	18,4272222	43,8238889
Varianza	90,3691624	376,47026
Observaciones	18	18
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	25	
Estadístico t	-4,98688335	
P(T<=t) una cola	1,9279E-05	
Valor crítico de t (una cola)	1,70814076	
P(T<=t) dos colas	3,8558E-05	
Valor crítico de t (dos colas)	2,05953855	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-92: Prueba t para Suelo 1 (Calibración 2).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	18,2416667	17,9438889
Varianza	87,6178618	89,0008252
Observaciones	18	18
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	34	
Estadístico t	0,09506271	
P(T<=t) una cola	0,46241154	
Valor crítico de t (una cola)	1,69092426	
P(T<=t) dos colas	0,92482308	
Valor crítico de t (dos colas)	2,03224451	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.2.2. Suelo 2.

Tabla 4-93: Prueba t para Suelo 2 (Calibración 1).

	<i>VWC_{grav}</i>	<i>VWC_{prom}</i>
Media	32,5694444	45,1744444
Varianza	232,000535	118,140591
Observaciones	18	18
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	31	
Estadístico t	-2,85796918	
P(T<=t) una cola	0,00377684	
Valor crítico de t (una cola)	1,69551878	
P(T<=t) dos colas	0,00755369	
Valor crítico de t (dos colas)	2,03951345	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-94: Prueba t para Suelo 2 (Calibración 2).

	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	33,5927778	32,5694444
Varianza	176,915504	232,000535
Observaciones	18	18
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	33	
Estadístico t	0,2147021	
P(T<=t) una cola	0,41566044	
Valor crítico de t (una cola)	1,69236031	
P(T<=t) dos colas	0,83132088	
Valor crítico de t (dos colas)	2,0345153	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.3.2.3. Suelo 3.

Tabla 4-95: Prueba t para Suelo 3 (Calibración 1).

	<i>VWC_{grav}</i>	<i>VWC_{prom}</i>
Media	6,31611111	15,3638889
Varianza	21,8188722	8,61846046
Observaciones	18	18
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	29	
Estadístico t	-6,95784712	
P(T<=t) una cola	5,9832E-08	
Valor crítico de t (una cola)	1,69912703	
P(T<=t) dos colas	1,1966E-07	
Valor crítico de t (dos colas)	2,04522964	

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-96: Prueba t para Suelo 3 (Calibración 2).

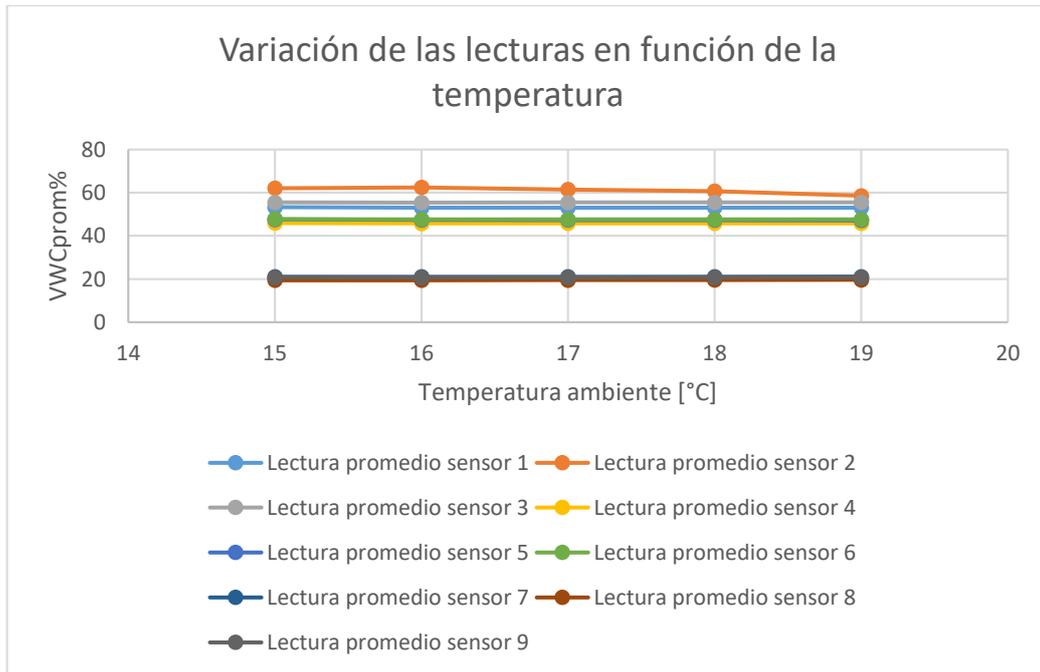
	<i>VWC_{prom}</i>	<i>VWC_{grav}</i>
Media	6,96888889	6,31611111
Varianza	11,1099046	21,8188722
Observaciones	18	18
Diferencia hipotética de las medias	0	
Grados de libertad	31	
Estadístico t	0,48262945	
P(T<=t) una cola	0,3163748	
Valor crítico de t (una cola)	1,69551878	
P(T<=t) dos colas	0,6327496	
Valor crítico de t (dos colas)	2,03951345	

Fuente: Elaboración propia.

4.2.4. Estabilidad de las lecturas.

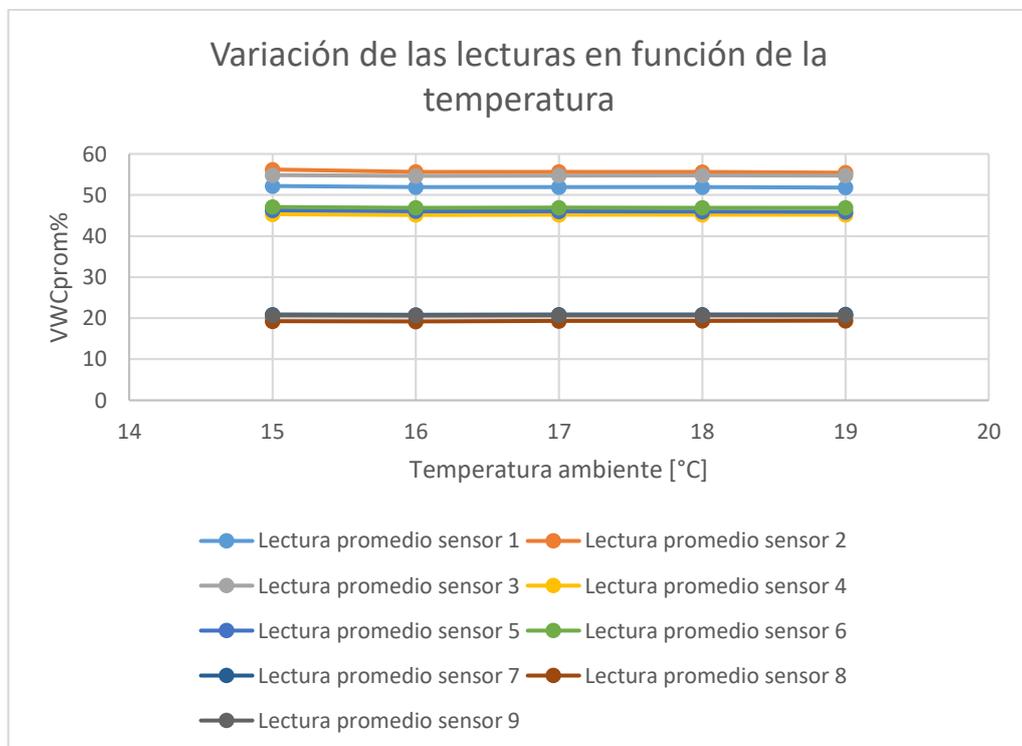
Dado que la cantidad de datos que recopilamos entre varias horas del día es bastante, se analizará la estabilidad de las lecturas en función de los cambios de temperatura dentro del ambiente donde se realizó el estudio.

Figura 4-84: Variación de las lecturas de los sensores en función de la temperatura, día 1.



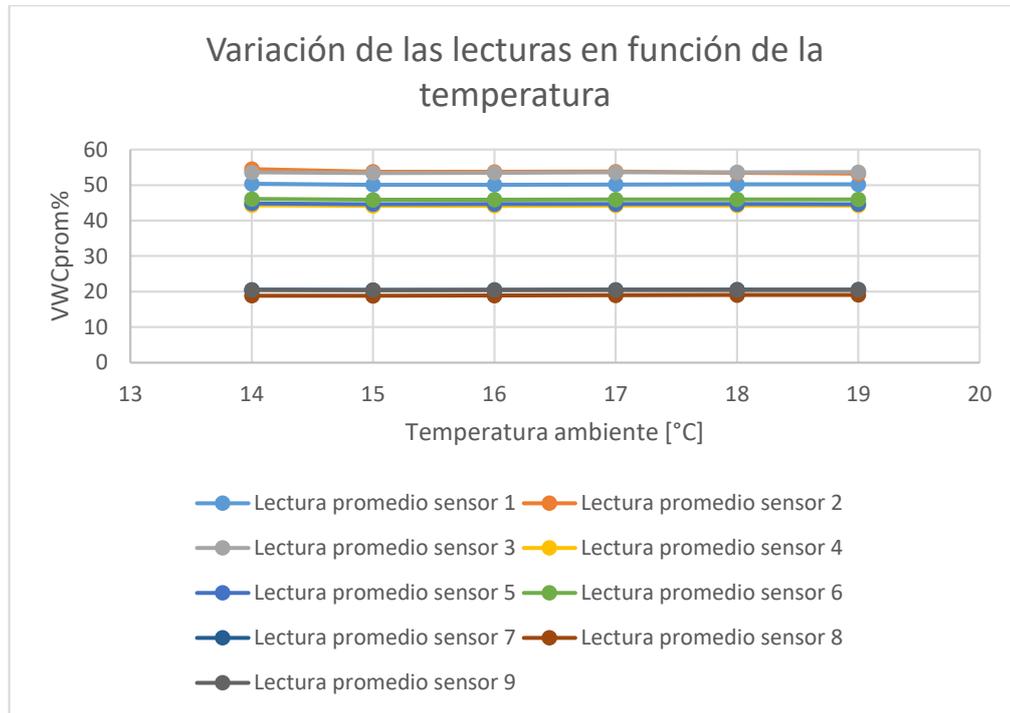
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-85: Variación de las lecturas de los sensores en función de la temperatura, día 2.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-86: Variación de las lecturas de los sensores en función de la temperatura, día 3.



Fuente: Elaboración propia.

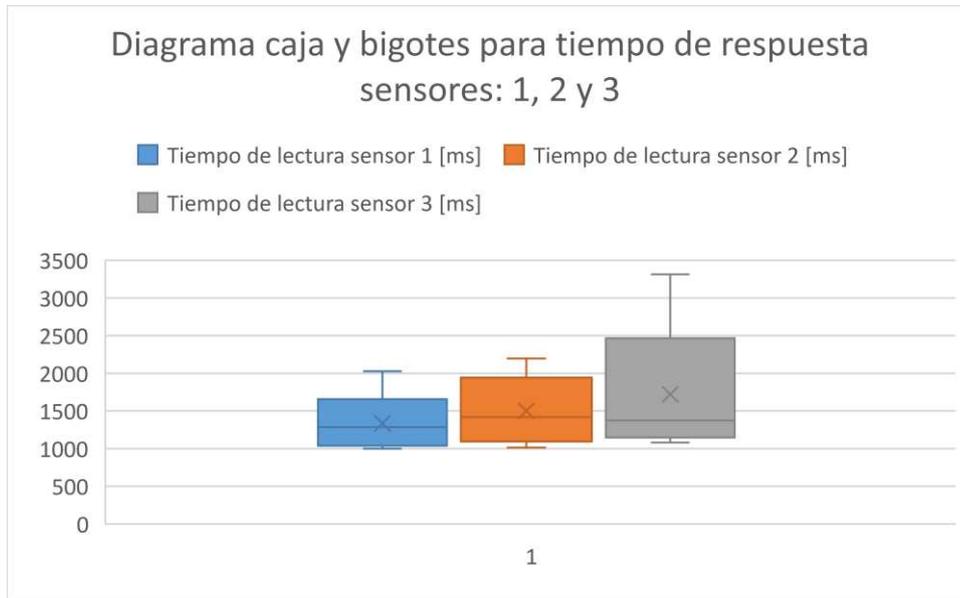
4.2.5. Tiempo de respuesta de los sensores.

Tabla 4-97: Tratamiento estadístico de los tiempos de respuesta de los sensores.

Punto de calibración	Tiempo de lectura sensor 1 [ms]	Tiempo de lectura sensor 2 [ms]	Tiempo de lectura sensor 3 [ms]	Tiempo de lectura sensor 4 [ms]	Tiempo de lectura sensor 5 [ms]	Tiempo de lectura sensor 6 [ms]	Tiempo de lectura sensor 7 [ms]	Tiempo de lectura sensor 8 [ms]	Tiempo de lectura sensor 9 [ms]
1	998	1014	1217	1622	1555	1598	1757	1420	1217
2	1284	2197	3312	1014	1305	1065	2502	1284	1555
3	2027	1420	1375	1216	2029	1486	2028	1488	2906
4	1285	1690	1622	1284	1217	1082	1081	1198	982
5	1082	1179	1081	1015	1487	1083	1622	1420	1352
Promedios	1335,2	1500	1721,4	1230,2	1518,6	1262,8	1798	1362	1602,4
Mediana	1284	1420	1375	1216	1487	1083	1757	1420	1352
Desviación estándar	406,68	465,71	911,65	249,83	316	258,03	523,27	117,88	757,92

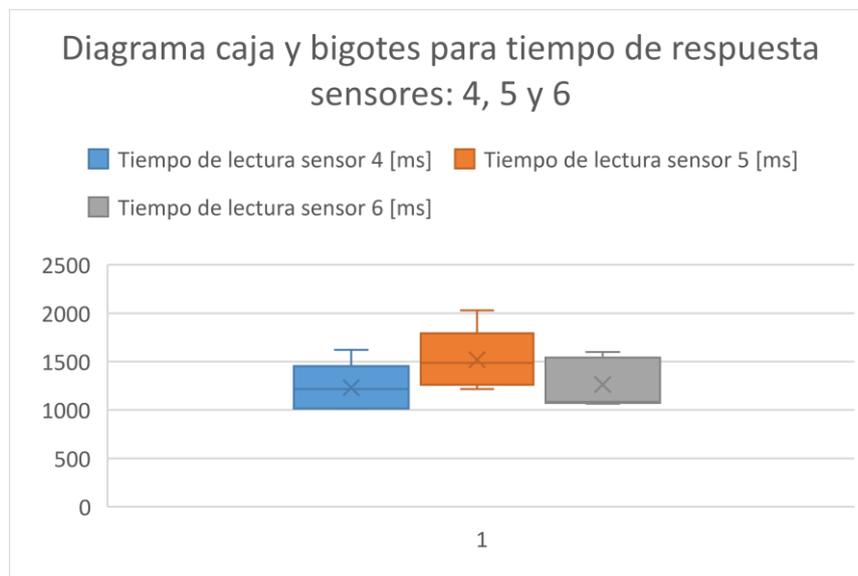
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-87: Diagrama caja y bigotes para tiempo de respuesta de los sensores; 1, 2 y 3.



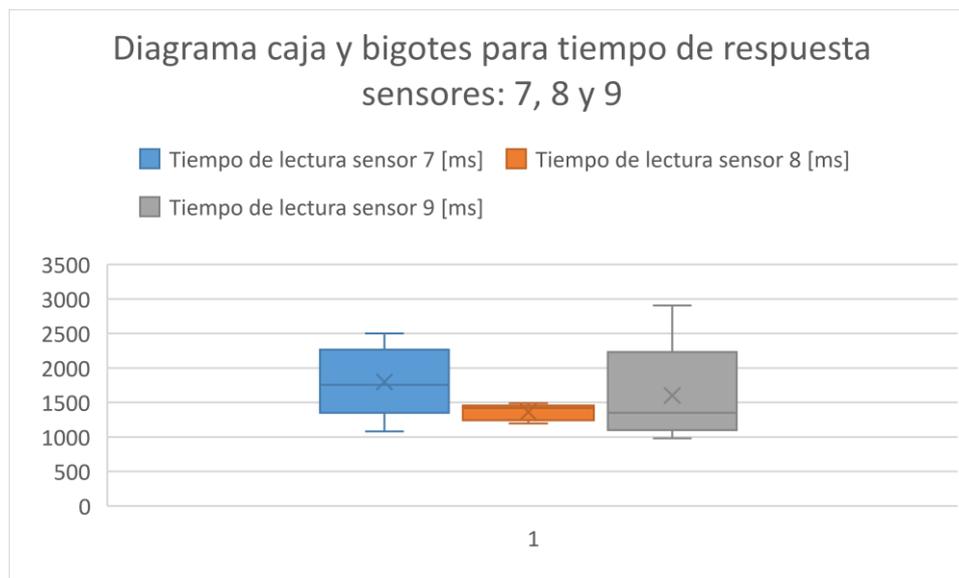
Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-88: Diagrama caja y bigotes para tiempo de respuesta de los sensores; 4, 5 y 6.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 4-89: Diagrama caja y bigotes para tiempo de respuesta de los sensores: 7, 8 y 9.



Fuente: Elaboración propia.

4.3. Incertidumbre de las mediciones.

El análisis de incertidumbre que se realizará, será la incertidumbre tipo A, la cual será aplicada a los valores obtenidos por la ecuación de calibración, realizandolo de la siguiente manera:

Para la media, esta se obtendrá mediante el promedio de los datos recolectados de los sensores. Se obtendrá los datos de la desviación estándar. Se obtendrá la incertidumbre tipo A, a partir de la siguiente ecuación:

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \text{ Ecuación 4-4}$$

Con estas consideraciones, los datos obtenidos son los siguientes:

Primeramente, se observará la incertidumbre de las lecturas en función de los cambios de temperatura.

Tabla 4-98: Incertidumbre por variación de lecturas por cambio de temperatura dentro del Laboratorio.

N° de sensor	Día 1		Día 2		Día 3	
	Desviación estándar	Incertidumbre	Desviación estándar	Incertidumbre	Desviación estándar	Incertidumbre
1	0,14	0,06	0,1	0,06	0,08	0,04

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
 FACULTAD DE INGENIERÍA
 MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y ELECTROMECAÁNICA

2	0,45	0,2	0,45	0,18	1,54	0,2
3	0,1	0,04	0,1	0,04	0,05	0,04
4	0,07	0,03	0,07	0,03	0,06	0,03
5	0,08	0,04	0,08	0,03	0,17	0,04
6	0,07	0,03	0,07	0,03	0,07	0,03
7	0,04	0,02	0,04	0,02	0,03	0,02
8	0,1	0,04	0,1	0,04	0,08	0,04
9	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-99: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 1 (Calibración 1).

Dato recolectado	SUELO 1								
	Sensor 1			Sensor 2			Sensor 3		
	VWC_{pro1}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	VWC_{prc}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	VWC_{pr}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A
1	8,46	0,26	0,12	14,49	0,78	0,35	7,56	0,21	0,09
2	47,02	0,12	0,05	31,37	0,33	0,15	33,09	0,22	0,10
3	47,77	0,97	0,43	33,48	1,24	0,55	29,79	1,18	0,53
4	53,08	0,21	0,09	60,36	0,18	0,08	56,12	0,21	0,09
5	55,78	1,07	0,48	61,75	1,02	0,46	58,28	0,41	0,18
6	59,30	0,41	0,18	67,20	2,00	0,89	63,93	2,04	0,91

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-100: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 2 (Calibración 1).

Dato recolectado	SUELO 2								
	Sensor 4			Sensor 5			Sensor 6		
	VWC_{pr}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	VWC_{prc}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	VWC_{prc}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A
1	18,17	2,36	1,06	20,53	0,49	0,22	43,16	1,75	0,78
2	34,36	0,10	0,04	51,80	0,12	0,05	47,95	0,13	0,06
3	41,05	0,88	0,39	50,42	0,69	0,31	39,07	0,42	0,19
4	50,13	0,12	0,05	51,86	0,15	0,07	51,14	0,35	0,16
5	50,23	0,22	0,10	51,91	0,18	0,08	50,92	0,59	0,26
6	52,65	1,12	0,50	54,46	1,19	0,53	53,33	1,08	0,48

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-101: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 3 (Calibración 1).

SUELO 3

Dato recolectado	Sensor 7			Sensor 8			Sensor 9		
	VWC_{pr}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	$VWC_{prom}\%$	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	VWC_{pr}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A
1	11,11	0,26	0,12	10,04	0,28	0,13	11,73	0,30	0,13
2	15,36	0,07	0,03	11,63	0,07	0,03	13,71	0,08	0,04
3	14,68	0,26	0,12	13,27	0,28	0,13	14,39	0,47	0,21
4	16,09	0,07	0,03	16,98	0,09	0,04	17,56	0,07	0,03
5	17,40	0,07	0,03	17,70	0,16	0,07	17,82	0,07	0,03
6	18,72	0,51	0,23	18,73	0,44	0,20	19,63	0,97	0,43

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-102: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 1 (Calibración 2).

Dato recolectado	SUELO 1								
	Sensor 1			Sensor 2			Sensor 3		
	$VWC_{prom}\%$	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	$VWC_{prom}\%$	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	$VWC_{prom}\%$	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A
1	1,05	0,08	0,04	4,35	0,35	0,16	0,8	0,11	0,05
2	18,43	0,07	0,03	12,04	0,14	0,06	14,18	0,11	0,05
3	19,12	0,16	0,07	13,24	0,32	0,14	12,8	0,27	0,12
4	21,16	0,09	0,04	25,21	0,4	0,18	26,15	0,08	0,04
5	22,4	0,5	0,22	25,73	0,51	0,23	27,43	0,13	0,06
6	24,65	1,01	0,45	29,32	0,82	0,37	30,29	0,94	0,42

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-103: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 2 (Calibración 2).

Dato recolectado	SUELO 2								
	Sensor 4			Sensor 5			Sensor 6		
	VWC_{prc}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	VWC_{prc}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	VWC_{pron}	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A
1	11,01	0,13	0,06	5,41	0,56	0,25	6,27	0,09	0,04
2	27,77	0,13	0,06	39,79	0,10	0,04	35,18	0,22	0,10
3	35,10	0,73	0,33	38,45	0,20	0,09	25,42	1,00	0,45
4	45,71	0,13	0,06	39,86	0,10	0,04	38,29	0,10	0,04
5	45,89	0,16	0,07	39,89	0,13	0,06	38,33	0,16	0,07
6	49,00	1,25	0,56	42,19	1,25	0,56	41,11	1,02	0,46

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 4-104: Incertidumbre por variación de lectura del sistema en funcionamiento, suelo 3 (Calibración 2).

Dato recolectado	SUELO 3								
	Sensor 7			Sensor 8			Sensor 9		
	$VWC_{prom}\%$	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	$VWC_{prom}\%$	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A	$VWC_{prom}\%$	Desviación estándar	Incertidumbre Tipo A
1	2,41	0,26	0,12	2,77	0,23	0,10	0,77	0,12	0,05
2	6,88	0,06	0,03	4,03	0,06	0,03	4,08	0,12	0,05
3	6,24	0,17	0,08	5,44	0,23	0,10	5,68	0,26	0,12
4	8,98	0,12	0,05	6,88	0,38	0,17	9,68	0,32	0,14
5	8,22	0,34	0,15	8,72	0,09	0,04	11,00	0,14	0,06
6	10,51	0,56	0,25	10,30	0,32	0,14	12,85	0,77	0,34

Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se realizará el análisis de la incertidumbre por calibración, para ello es necesario saber la desviación estándar de cada curva de calibración del sensor.

Para hallar la incertidumbre de la calibración se aplicará la siguiente ecuación

$$u = \frac{\sigma}{\sqrt{3}} \text{ Ecuación 4-5}$$

Las desviaciones estándar se obtienen de los datos de las curvas de calibración de los sensores

Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 4-105: Análisis de incertidumbre de curvas de calibración.

Sensor	Desviación estándar curva de calibración 1	Desviación estándar curva de calibración 2	Incertidumbre de curva de calibración 1 % (VWC)	Incertidumbre de curva de calibración 2 % (VWC)
1	6,13	2,67	3,54	1,54
2	6,13	2,41	3,54	1,39
3	3,88	2,74	2,24	1,58
4	4,67	5,24	2,69	3,03
5	4,67	5,10	2,69	2,94
6	4,67	4,80	2,69	2,77
7	3,84	3,41	2,22	1,97
8	3,84	3,16	2,22	1,82
9	3,84	4,73	2,22	2,73

Fuente: Elaboración propia.

Para la incertidumbre total de cada sensor, se considerará la siguiente ecuación:

$$u_{sensor} = \sqrt{\sum u_d^2 + \sum u_m^2 + \sum u_t^2}$$

Ecuación 4-6

Donde:

u_d : Incertidumbres en el proceso de medición % (VWC).

u_m : Incertidumbres de las curvas de calibración % (VWC).

u_t : Incertidumbre de las temperaturas % (VWC).

Considerando dichos valores, se tiene la siguiente tabla con los resultados expuestos:

Tabla 4-106: Incertidumbre total para cada sensor.

Nº de sensor	Incertidumbre en calibración 1 % (VWC)	Incertidumbre en calibración 2 % (VWC)
1	3,61	1,62
2	3,76	1,52
3	2,49	1,64
4	2,96	3,10
5	2,77	3,01
6	2,87	2,85
7	2,24	2,00
8	2,24	1,84
9	2,28	2,76

Fuente: Elaboración propia.

4.4. Validación.

A través de las muestras recolectadas y de los datos obtenidos, se puede realizar un análisis estadístico que determine la calidad de las lecturas recolectadas por el sensor, siendo un punto de partida imprescindible la calibración.

Una adecuada calibración puede beneficiar enormemente a que el sistema detecte los cambios de humedad con valores más aproximados. Esto se lo observó al momento de comparar las lecturas producidas por las ecuaciones de la calibración 1 y 2, que, a pesar de

seguir el mismo método, otros factores como ser la conexión individual de cada sensor a un pin analógico designado, afectan de forma significativa las lecturas, lecturas que pasan a ser analizadas. Observando previamente si las lecturas son afectadas por los cambios de temperatura dentro del ambiente en el laboratorio.

En el análisis de regresión, lo que hay que evaluar es la correlación de los valores hallados por ambos métodos de medición, esto se logra observando R^2 y observando si los valores que se muestran se acercan la línea de tendencia, esta línea representa el estado ideal en el cual los valores obtenidos por ambos métodos coinciden entre si.

El análisis de Bland-Altman permite observar la tendencia que tienen las lecturas de ambos métodos en tener una diferencia entre las mismas próximas a cero, lo cual indicaría que hay gran concordancia entre los valores medidos por ambos métodos.

En el análisis t, se puede apreciar si hay gran significancia en la diferencia de valores obtenidos por ambos métodos, siendo un buen indicador si el estadístico t es bajo, ya que indicaría que la diferencia entre las lecturas no tiene mucha significancia.

El análisis estadístico de tiempo de respuesta ayuda a comprender que tan rápido puede reaccionar el sensor ante cambios externos que involucren el factor a medirse, observando esta tendencia y los valores típicos de los tiempos de respuesta.

El análisis de incertidumbre proporciona información importante para saber en qué rango de lectura está el valor verdadero, brindando un nivel de confiabilidad en los sensores.

CAPÍTULO V

5. RESULTADO DE LA INVESTIGACIÓN

Durante la investigación, se observaron resultados los cuales cuestionan el funcionamiento de los sensores, aunque se puede tener cierta confianza en que los mismos trabajen en algunos ambientes y bajo ciertas condiciones de calibración, por ello los resultados según los análisis estadísticos se lo realizarán por elemento sensor y a su vez de forma más genérica por elemento suelo

5.1. Estabilidad de la lectura.

La estabilidad de las lecturas dentro del ambiente, se basaron en las variaciones promedio a medida que la temperatura dentro del mismo cambiaba, las temperaturas dentro del ambiente oscilaron entre los 14 [°C] a los 19 [°C], observándose en la Figura 4-85, Figura 4-86, Figura 4-87, que las variaciones no son muy significativas por lo cual se considera que las mismas no influyen en el buen funcionamiento del sensor, aunque de igual forma se lo considera para el análisis de incertidumbre,

5.2. Tiempo de respuesta de los sensores.

En cuanto al tiempo de respuesta de los sensores, en promedio el tiempo de respuesta es un aproximado entre 1 a 3 segundos, tiempo en el cual tarda en estabilizarse y ofrecer una lectura estable frente al cambio de humedad del suelo.

Observándose el diagrama caja y bigotes de la Figura 4-87 a la Figura 4-89, puede apreciarse que algunos sensores tuvieron más discrepancias que otros, sin embargo, se encuentran en un tiempo de reacción bastante aceptable y útil para aplicaciones de riego,

5.3. Calidad de las lecturas.

En este punto se puede afirmar que el funcionamiento de los sensores varía frente al tipo de suelo, para ello se presenta la Tabla 5-2, el cual resume las características de los sensores.

Para la siguiente Tabla 5-1, se asignan algunos términos descriptivos en siglas, para entender mejor la Tabla 5-2.

Tabla 5-1: Simbología para cuadro de resultados.

Diagrama de Bland-Altman				Análisis de regresión	
Proximidad al cero		Proximidad a la diferencia media		Proximidad a línea de tendencia	
Descripción	Simbología	Descripción	Simbología	Descripción	Simbología
Ninguna diferencia está próxima al cero	NDPC	Ningún Valor está próxima a la diferencia	NVPDM	Ningún Valor está próxima a la línea de tendencia	NVPLT
Muy pocas diferencias están próximas al cero	MPDPC	Muy pocos valores próximos al diferencia media	MPVPDM	Muy pocos valores próximos al línea de tendencia	MPVPLT
Algunas diferencias están próximas al cero	ADPC	Algunos valores próximos a la diferencia	AVPDM	Algunos valores próximos a la línea de tendencia	AVPLT
Varias diferencias están próximas al cero	VDPC	Varias valores están próximas a la diferencia media	VVPDM	Varias valores están próximas a la línea de tendencia	VVPLT

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-2: Tabla resumen de resultados: Por sensores.

Sensor	Análisis de regresión				Bland-Altman				Prueba t					
	Calibración 1		Calibración 2		Calibración 1		Calibración 2		Calibración 1		Calibración 2			
	Evaluación de intersección	Coficiente R	Evaluación de intersección	Coficiente R	Promedio de la diferencia	Evaluación del diagrama de Bland-Altman	Promedio de la diferencia	Evaluación del diagrama de Bland-Altman	Estadístico t	Valor P para una cola	Valor P para dos colas	Estadístico t	Valor P para una cola	Valor P para dos colas
1	AVPLT	0,7057	VVPLT	0,7945	-27,80	NDPC, MPVPDM	-0,37	ADPC, AVPDM	3,27	0,01	0,01	0,072	0,47	0,94
2	AVPLT	0,8562	VVPLT	0,9126	-25,89	NDPC, MPVPDM	-0,88	ADPC, AVPDM	2,72	0,01	0,03	0,16	0,44	0,88
3	AVPLT	0,9439	VVPLT	0,9597	-22,49	NDPC, AVPDM	0,36	ADPC, AVPDM	2,25	0,03	0,05	0,05	0,48	0,96
4	MPVPLT	0,4129	AVPLT	0,6559	-6,45	ADPC, AVPDM	-1,10	VDPC, AVPDM	0,73	0,24	0,48	0,12	0,45	0,91
5	MPVPLT	-0,175	MPVPLT	0,5451	-14,04	MPDPC, MPVPDM	-1,47	MPDPC, AVPDM	1,60	0,07	0,14	0,16	0,44	0,87
6	AVPLT	-9,016	VVPLT	0,8875	-17,33	NDPC, AVPDM	-0,50	VDPC, AVPDM	2,82	0,02	0,03	0,06	0,47	0,95
7	MPVPLT	-9,924	MPVPLT	-0,504	-9,71	NDPC, AVPDM	-1,36	MPDPC, AVPDM	4,4	0,001	0,002	0,6	0,28	0,56
8	MPVPLT	-2,022	AVPLT	0,593	-8,96	NDPC, VVPDM	-0,60	MPDPC, AVPDM	4,03	0,001	0,002	0,29	0,39	0,78
9	MPVPLT	-5,871	AVPLT	0,809	-8,47	NDPC, VVPDM	-0,01	MPDPC, AVPDM	3,20	0,01	0,01	0,002	0,5	1,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla 5-3: Tabla resumen de resultados: Por tipo de suelo.

Suelo	Análisis de regresión				Bland-Altman				Prueba t					
	Calibración 1		Calibración 2		Calibración 1		Calibración 2		Calibración 1		Calibración 2			
	Evaluación de intersección	Coficiente R	Evaluación de intersección	Coficiente R	Promedio de la diferencia	Evaluación del diagrama de Bland-Altman	Promedio de la diferencia	Evaluación del diagrama de Bland-Altman	Estadístico t	Valor P para una cola	Valor P para dos colas	Estadístico t	Valor P para una cola	Valor P para dos colas
1	AVPLT	0,8266	AVPLT	0,9004	-25,40	NDPC, MPVPDM	-0,54	ADPC, AVPDM	4,98	0,0000193	0,0000386	0,095	0,46	0,92
2	MPVPLT	-0,639	MPVPLT	0,6943	-12,61	NDPC, MPVPDM	-1,02	ADPC, AVPDM	2,86	0,00377	0,00755	0,21	0,45	0,83
3	MPVPLT	-5,226	AVPLT	0,4913	-9,05	NDPC, AVPDM	-0,65	ADPC, AVPDM	6,96	0,0000000598	0,00000012	0,48	0,32	0,63

Fuente: Elaboración propia.

Cómo puede apreciarse en la tabla de resultados, los sensores tienen un comportamiento que varía al tipo de suelo y a la forma calibración realizada, afirmando el hecho que, si reaccionan con la humedad de suelo y sus lecturas no son afectadas significativamente por la temperatura ambiente, pero en cuanto a la precisión de lecturas depende mucho de los factores suelo y calibración.

Destacando que la calibración 2 brindó resultados satisfactorios, pero aún se ve afectado por el tipo de suelo.

En el caso de las incertidumbres, como se puede apreciar en la Tabla 4-106, todas son mayores a 1, teniendo una menor incertidumbre en general en la calibración 2, no obstante, sigue siendo relativamente alto, por lo cual las lecturas de los sensores tienen una variabilidad considerable.

Por otra parte, durante el análisis de tiempos de respuesta de los sensores, observando el diagrama caja y bigotes, se puede observar que el tiempo de respuesta típico de un sensor oscila entre 1 a 1,5 segundos, siendo valores atípicos los tiempos de respuesta de 2 segundos o superior o tiempos inferiores a 1 segundo.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1. Conclusiones.

- Se recolectaron datos de humedad del suelo en las macetas mediante dos métodos: gravimétrico y el sistema de riego automático, utilizando dos calibraciones diferentes. El método gravimétrico resultó ser laborioso debido al tiempo requerido para secar una gran cantidad de muestras en el horno y registrar las masas antes y después del secado, incluidas las muestras necesarias para la curva de calibración. A pesar de la complejidad del proceso, se obtuvieron suficientes muestras tanto para la calibración como para la evaluación del sistema en funcionamiento, logrando curvas de calibración satisfactorias.
- Se analizaron los datos obtenidos por los sensores en dos enfoques principales: Calibración 1 y Calibración 2. Estos datos fueron evaluados tanto por sensor como por tipo de suelo, con el objetivo de comprender mejor el comportamiento de los sensores en distintos tipos de suelo y explorar su potencial aplicación. Los resultados de las comparaciones se reflejan en los análisis de regresión, que se presentan en las Figuras 4-36 a 4-53 para cada sensor, y en las Figuras 4-54 a 4-59 para cada tipo de suelo y calibración correspondiente. Además, se realizaron análisis mediante el método de Bland-Altman, cuyos resultados se pueden observar en las Figuras 4-64 a 4-77 para cada sensor, y en las Figuras 4-78 a 4-83 para cada tipo de suelo y calibración. También se llevó a cabo la prueba t, con resultados expresados en las Tablas 4-73 a 4-90 para cada sensor, y en las Tablas 4-91 a 4-96 para cada tipo de suelo y calibración correspondiente. Finalmente, junto con los tiempos de respuesta obtenidos (Tabla 4-97), se calculó la incertidumbre total para cada sensor, la cual se presenta en la Tabla 4-106.
- Al inicio de las pruebas, se observó que, en el suelo franco, el agua suministrada por la bomba de riego permanecía en la superficie durante un tiempo considerable antes de ser absorbida. Esto contrasta con el suelo arenoso, donde la absorción fue mucho más rápida. Esta diferencia en la absorción podría explicar los resultados dispersos obtenidos tanto en comparación con el método gravimétrico como con los resultados del suelo arcilloso. Es posible que el sistema de riego por goteo no sea adecuado para el suelo franco, o que sea necesario implementar tiempos de riego más prolongados

para permitir una distribución uniforme del agua en el suelo y así obtener lecturas más confiables. En cuanto al suelo arenoso, podría ser necesario reposicionar el sensor, ya que, según el análisis de Bland-Altman, la dispersión de las lecturas no es tan significativa en comparación con otros suelos, sin embargo, el coeficiente de correlación sugiere dudas sobre si el método aplicado o el sensor utilizado es el más adecuado para este tipo de suelo.

- La evaluación realizada en este trabajo sobre la eficiencia en la recolección de datos para el sistema de riego automático en el Laboratorio de Riego de la Facultad de Agronomía de la U.M.S.A. permitió identificar que la precisión de las lecturas de los sensores depende significativamente del método de calibración utilizado. Como se evidenció en los análisis de regresión (acápite 4.2.1), en el análisis Bland-Altman (acápite 4.2.2), en la prueba t (acápite 4.2.3) y en el análisis de incertidumbre, la calibración 2 mostró resultados superiores a la calibración 1. Aunque ambos métodos siguen los pasos de la calibración tipo A, la principal diferencia radica en la rigurosidad de la ejecución, siendo la calibración 2 más estricta, lo que se reflejó en las ecuaciones presentadas en las Tablas 4-24 y 4-25. En particular, el término independiente en las ecuaciones de la calibración 1 genera dudas sobre su precisión, mientras que la calibración 2 ofrece mayor confianza. Estos resultados sugieren que, para obtener lecturas precisas con estos sensores, es necesario realizar una calibración tipo A más rigurosa, considerando cuidadosamente aspectos como la ubicación y el conexionado del sensor. Sin embargo, las lecturas aún presentan diferencias notables según el tipo de suelo, especialmente en suelos franco y arenoso. Los análisis de regresión (acápite 4.2.1.2) muestran diferencias significativas en los coeficientes de correlación de 0,9004 (Arcilloso), 0,6943 (Franco) y 0,4913 (Arenoso), lo cual puede atribuirse a la estructura interna de los suelos, que afecta la distribución del agua. Esto indica que estos sensores no son ideales para todos los tipos de suelo, pero a pesar de ello, su respuesta a los cambios de humedad como se observa en la Tabla 4-97 es satisfactorio y en particular, los sensores resultaron adecuados para suelos arcillosos, donde sus lecturas fueron más consistentes. No obstante, su aplicabilidad en cultivos o sistemas que requieren un control extremadamente preciso de la humedad podría ser limitada; para aplicaciones críticas donde la precisión es fundamental, podrían ser necesarios métodos adicionales o sensores con mayor exactitud.

6.2. Recomendaciones.

- Realizar un estudio comparativo con el Sensor de suelo capacitivo marca DFRobot, para observar si las lecturas inusuales que se da es debido a un defecto de fabricación por bajo costo.
- Realizar un estudio comparativo con otros tipos de sensores capacitivos de bajo costo, para observar su comportamiento durante su funcionamiento continuo y tenerlos como alternativa a los sensores de marca.
- Estudiar el gasto de agua del sistema de riego, para optimizar el sistema y, basándose en lo observado durante la obtención de muestras en los 3 tipos de suelo puestos a prueba, determinar los tiempos de goteo que se requiere, ya que el presente trabajo de investigación solo se enfoca en el estudio de la recolección de datos del sistema de riego más no el gasto de agua que produce.

BIBLIOGRAFÍA/WEBGRAFÍA

- Adla, S., Kumar Rai, N., Harsha Karumanchi, S., Tripathi, S., Disse, M., & Pande, S. (2020). Laboratory Calibration and Performance Evaluation of Low-Cost Capacitive and Very Low-Cost Resistive Soil Moisture Sensors. *MDPI*.
- Arduino.cl*. (11 de Noviembre de 2023). Obtenido de <https://arduino.cl/escalamiento-y-funcion-map/>
- Castillo Cerna, C. M. (Septiembre de 2005). Selección y calibración de indicadores locales y técnico para evaluar la degradación de los suelos laderas, en la microcuenca Cuscáma el Tuma-La Dalia Matagalpa, 2005. Managua, Nicaragua.
- DFROBOT DRIVE THE FUTURE*. (s.f.). Obtenido de https://wiki.dfrobot.com/Capacitive_Soil_Moisture_Sensor_SKU_SEN0193
- Florio, M. (Octubre de 2022). Análisis y diseño del sistema de riego en capinota-Bolivia. Barcelona, España.
- Gil Martinez, C. (Noviembre de 2017). *Análisis gráfico de blan altman*. Obtenido de https://rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com/326677_ed20688ec0b14e39986fc4afe0144748.html
- González Medrano, M. Z. (Julio de 2017). Sistema de riego automatizado. Revista Iberoamericana de Producción Académica y Gestión Educativa.
- Guarachi Loza, R. A. (2018). Optimización de sistema de riego usando tecnologías apropiadas (automatización). La Paz, Bolivia.
- Guijarro Rodriguez, A. (19 de Mayo de 2018). Sistema de riego automatizado con Arduino. Revista ESPACIOS.
- Hidalgo Ajata, R. C. (2020). Diseño de circuito de medición de agua del suelo basado en Arduino para riego deficitario controlado. La Paz, Bolivia.
- Lopez Mamani, G. A. (2020). Sistema de riego automatizado para un uso eficiente de agua. La Paz, Bolivia.

Marin Mendoza, D. W. (2018). Diseño e implementación de un sistema de riego automático para los cultivos de la facultad de agronomía U.M.S.A. La Paz, Bolivia.

Vásconez Cuzco, J. C. (Mayo de 2013). Diseño e implementación de un sistema de riego automatizado y controlado de forma inalámbrica para una finca ubicada en el sector de Balerio Estacio. Guayaquil, Ecuador.

Villafálifa, E., & Wyss, F. (2009). Riego en Horticultura: Guía para la instalación de pequeños sistemas de riego. *INTA*.

Zach. (22 de Marzo de 2021). *STATOLOGY*. Obtenido de Statics. Simplified: <https://www.statology.org/bland-altman-plot-excel/>

ANEXOS

ANEXO A: ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE CALIBRACIÓN ENCONTRADAS

ANEXO B: DATOS PARA DIAGRAMA DE BLAND-ALTMAN

ANEXO C: PROGRAMAS UTILIZADOS

ANEXO D: PLANOS

ANEXO E: HOJA TÉCNICA.

ANEXO A: ESTIMACIÓN DE ECUACIONES DE CALIBRACIÓN ENCONTRADAS.

CALIBRACIÓN 1

SENSOR 1

Tabla A 1: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 1 (Calibración 1).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración	Valores estimados de VWC
1	750	$y = -0,1353x + 105,71$	4,23
2	676		14,25
3	655		17,09
4	645		18,44
5	620		21,82

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 2: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 1, Suelo 1.

Muestra	Lecturas del sensor 1 RAW	Valores estimados de VWC Ecuación de calibración %	Valores reales de VWC Método gravimétrico %
1	750	4,23	5,07
2	676	14,25	13,54
3	655	17,09	15,07
4	645	18,44	18,54
5	620	21,82	23,63

Fuente: Elaboración propia.

SENSOR 2

Tabla A 3: Estimación de VWC a partir de la ecuación hallada Sensor 2, Suelo 1.

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	750	$y = -0,1604x + 124,46$	4,16
2	685		14,59
3	674		16,35
4	654		19,56
5	645		21,00

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 4: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 2, Suelo 1 (Calibración 1).

Muestra	Lecturas del sensor 1 RAW	Valores estimados de VWC Ecuación de calibración %	Valores reales de VWC Método gravimétrico %
1	750	4,16	5,07
2	685	14,59	13,54
3	674	16,35	15,07
4	654	19,56	18,54
5	645	21,00	23,63

Fuente: Elaboración propia.

SENSOR 3

Tabla A 5: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 3, Suelo 1 (Calibración 1).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	755		4,09
2	670		15,43
3	656	$y = -0,1334x + 104,81$	17,30
4	644		18,90
5	635		20,10

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 6: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 3, Suelo 1.

Muestra	Lecturas del sensor 1 RAW	Valores estimados de VWC Ecuación de calibración %	Valores reales de VWC Método gravimétrico %
1	755	4,09	5,07
2	670	15,43	13,54
3	656	17,30	15,07
4	644	18,90	18,54
5	635	20,10	23,63

Fuente: Elaboración propia.

SENSOR 4

Tabla A 7: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 4, Suelo 2 (Calibración 1).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	796	$y = -0,0743x + 76,728$	17,59

2	747	21,23
3	727	22,71
4	655	28,06
5	624	30,36

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 8: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 4.

Muestra	Lecturas del sensor 1 RAW	Valores estimados de VWC Ecuación de calibración %	Valores reales de VWC Método gravimétrico %
1	796	17,59	17,62
2	747	21,23	20,48
3	727	22,71	23,55
4	655	28,06	27,78
5	624	30,36	30,43

Fuente: Elaboración propia.

SENSOR 5

Tabla A 9: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 5, Suelo 2 (Calibración 1).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	783		17,32
2	735		21,07
3	707	$y = -0,078x + 78,395$	23,25
4	641		28,40
5	622		29,88

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 10: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 5, Suelo 2.

Muestra	Lecturas del sensor 1 RAW	Valores estimados de VWC Ecuación de calibración %	Valores reales de VWC Método gravimétrico %
1	371,5	17,32	17,62
2	429,5	21,07	20,48
3	467	23,25	23,55
4	490,25	28,40	27,78
5	505	29,88	30,43

Fuente: Elaboración propia.

SENSOR 6

Tabla A 11: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 6, Suelo 2 (Calibración 1).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	794		17,65
2	752		20,98
3	728	$y = -0,0791x + 80,459$	22,87
4	669		27,54
5	629		30,71

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 12: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 6, Suelo 2.

Muestra	Lecturas del sensor 1 RAW	Valores estimados de VWC Ecuación de calibración %	Valores reales de VWC Método gravimétrico %
1	794	17,65	17,62
2	752	20,98	20,48
3	728	22,87	23,55
4	669	27,54	27,78
5	629	30,71	30,43

Fuente: Elaboración propia.

SENSOR 7.

Tabla A 13: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 7, Suelo 3 (Calibración 1).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	702		17,56
2	676		19,02
3	548	$y = -0,0561x + 56,943$	26,20
4	514		28,11
5	454		31,47

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 14: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 7, Suelo 3.

Muestra	Lecturas del sensor 1 RAW	Valores estimados de VWC Ecuación de calibración %	Valores reales de VWC Método gravimétrico %

1	702	17,56	15,68
2	676	19,02	21,85
3	548	26,20	24,65
4	514	28,11	28,02
5	454	31,47	32,24

Fuente: Elaboración propia.

SENSOR 8

Tabla A 15: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 8, Suelo 3 (Calibración 1).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	671	$y = -0,0557x + 55,564$	18,19
2	648		19,47
3	575		23,54
4	467		29,55
5	431		31,56

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 16: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 8, Suelo 3.

Muestra	Lecturas del sensor 1 RAW	Valores estimados de VWC Ecuación de calibración %	Valores reales de VWC Método gravimétrico %
1	671	18,19	15,68
2	648	19,47	21,85
3	575	23,54	24,65
4	467	29,55	28,02
5	431	31,56	32,24

Fuente: Elaboración propia.

SENSOR 9

Tabla A 17: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 9, Suelo 3 (Calibración 1).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	687	$y = -0,0375x + 36,97$	18,15
2	657		19,76
3	592		23,25
4	478		29,37
5	431		31,89

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 18: Comparación de valores estimados y valores reales Sensor 9, Suelo 3.

Muestra	Lecturas del sensor 1 RAW	Valores estimados de VWC Ecuación de calibración %	Valores reales de VWC Método gravimétrico %
1	687	18,15	15,68
2	657	19,76	21,85
3	592	23,25	24,65
4	478	29,37	28,02
5	431	31,89	32,24

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 19: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 1 (Calibración 2)

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	719		1,06
2	424		19,03
3	389	$y = -0,0609x + 44,847$	21,16
4	365		22,62
5	344		23,9

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 20: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 2 (Calibración 2).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	694		3,74
2	563		13,21
3	400	$y = -0,0723x + 53,916$	25
4	387		25,94
5	363		27,67

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 21: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 3 (Calibración 2).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
---------	---------------------------	-----------------------------	--------------------------

1	741		-0,04
2	555		12,92
3	365	$y = -0.0697x + 51.608$	26,17
4	346		27,49
5	322		29,16

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 22: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 4 (Calibración 2).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	784		9,92
2	482		35,29
3	358	$y = -0.084x + 75.778$	45,71
4	356		45,87
5	334		47,72

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 23: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 5 (Calibración 2).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	753		4,43
2	356		38,45
3	340	$y = -0.0857x + 68.964$	39,83
4	337		40,08
5	322		41,37

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 24: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 6 (Calibración 2).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	764		6,21
2	525		25,73
3	371	$y = -0,0817x + 68,624$	38,31
4	372		38,23
5	353		39,78

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 25: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 7 (Calibración 2).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	678	$y = -0,0481x + 33,034$	0,42
2	553		6,43
3	502		8,89
4	521		7,97
5	475		10,19

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 26: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 8 (Calibración 2).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	684	$y = -0,0368x + 26,292$	1,12
2	572		5,24
3	487		8,37
4	473		8,89
5	451		9,70

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 27: Estimación de VWC a partir de ecuación hallada Sensor 9 (Calibración 2).

Muestra	Lecturas del sensor (RAW)	Ecuación de calibración (%)	Valores estimados de VWC
1	613	$y = -0,0751x + 46,733$	0,70
2	547		5,65
3	480		10,69
4	472		11,29
5	436		13,99

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO B: DATOS PARA EL DIAGRAMA DE BAND-ALTMAN

Tabla A 28: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 1 (Ecuación de calibración).

SUELO 1	
Promedio entre VWCprom y VWCgrav	Diferencia entre VWCprom y VWCgrav
5,44	-6,04
31,93	-30,19
29,77	-36,00
37,96	-30,25
39,09	-33,38
43,82	-30,96
7,99	-13,01
24,59	-13,57
25,42	-16,13
41,82	-37,09
43,31	-36,88
47,86	-38,68
4,49	-6,14
25,64	-14,91
19,96	-19,67
41,81	-28,62
42,24	-32,08
47,16	-33,54
Promedio de diferencias	-25,4

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 29: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 2 (Ecuación de calibración).

SUELO 2	
Promedio entre VWCprom y VWCgrav	Diferencia entre VWCprom y VWCgrav
11,67	-13,00
28,9	-10,92
45,6	9,09
45,97	-8,33
48,47	-3,52
46,63	-12,04
12,99	-15,08
42,17	-19,26
37,53	-25,78
49,69	-4,35
42,73	-18,37

53,77	-1,38
24,22	-37,89
41,80	-12,31
32,82	-12,51
45,05	-12,19
40,29	-21,26
49,44	-7,79
Promedio de diferencias	-12,61

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 30: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 3 (Ecuación de calibración).

SUELO 3	
Promedio entre VWCprom y VWCgrav	Diferencia entre VWCprom y VWCgrav
6,21	-9,81
8,3	-14,13
10,45	-8,47
11,12	-9,95
11,73	-11,35
16,45	-4,54
5,75	-8,58
6,48	-10,31
9,22	-8,11
12,24	-9,48
12,3	-10,81
15,49	-6,49
6,53	-10,41
7,71	-12,01
10,21	-8,36
12,9	-9,33
13,94	-7,76
18,15	-2,96
Promedio de diferencias	-9,05

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 31: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 1 (Función map).

SUELO 1	
Promedio entre VWCprom y VWCgrav	Diferencia entre VWCprom y VWCgrav
18,73	-26,58

74,01	-84,17
75,89	-92,23
82,54	-89,17
87,39	-96,60
91,15	-94,66
23,75	-31,52
47,69	-46,20
50,74	-50,65
87,18	-90,73
89,38	-92,13
95,6	-95,48
14,28	-19,58
52,55	-53,82
48,40	-56,88
85,56	-87,50
89,14	-93,80
94,97	-95,61
Promedio de diferencias	-72,07

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 32: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 2 (Función map).

SUELO 2	
Promedio entre VWCprom y VWCgrav	Diferencia entre VWCprom y VWCgrav
16,59	-9,83
50,18	-42,56
64,53	-37,86
84,57	-77,20
85,12	-73,29
88,33	-83,39
19,77	-13,55
86,40	-88,46
83,71	-92,36
86,43	-73,49
86,46	-87,46
93,73	-79,92
68,58	-88,73
76,48	-69,36
54,54	-43,44
82,07	-74,05
82,96	-85,34
86,67	-74,46
Promedio de diferencias	-66,38

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 33: Datos para diagrama de Bland–Altman para suelo 3 (Función map).

SUELO 3	
Promedio entre VWCprom y VWCgrav	Diferencia entre VWCprom y VWCgrav
30,06	-47,70
44,18	-71,77
41,34	-61,79
47,05	-71,86
51,20	-78,95
54,86	-76,82
28,02	-44,54
32,82	-52,68
38,14	-57,84
49,99	-75,50
53,35	-82,11
58,87	-86,76
32,87	-52,68
39,36	-63,30
41,70	-62,97
51,28	-76,77
52,41	-76,94
55,82	-75,33
Promedio de diferencias	-67,57

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 34: Datos para diagrama de Bland-Altman para el suelo 1(Calibración 2).

SUELO 1	
Promedio entre VWCprom y VWCgrav	Diferencia entre VWCprom y VWCgrav
1,74	-1,93
17,63	4,79
15,45	-1,47
22,00	-2,38
22,40	-3,33
26,50	-0,98
3,39	0,62
14,44	4,00
12,51	-2,68
24,02	1,35
24,07	-1,23

28,83	0,10
1,11	-5,84
16,18	-4,33
11,46	15,04
26,83	-3,91
26,82	0,82
30,34	-8,39
Promedio de las diferencias	-0,54

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 35: Datos para diagrama de Bland-Altman para el suelo 2 (Calibración 2).

SUELO 2	
Promedio entre VWCprom y VWCgrav	Diferencia entre VWCprom y VWCgrav
8,09	-5,84
25,61	-4,33
42,62	15,04
43,76	-3,91
46,30	0,82
44,81	-8,39
5,43	0,04
36,17	-7,25
31,55	-13,81
43,69	7,65
36,72	-6,35
47,64	10,89
5,77	-1,00
35,41	0,46
25,99	1,14
38,62	0,66
34,00	-8,67
43,33	4,43
Promedio de las diferencias	-1,02

Fuente: Elaboración propia.

Tabla A 36: Datos para diagrama de Bland-Altman para el suelo 3 (Calibración 2).

SUELO 3	
Promedio entre VWCprom y VWCgrav	Diferencia entre VWCprom y VWCgrav

1,86	-1,11
4,06	-5,65
6,23	-0,03
7,56	-2,84
7,14	-2,17
12,35	3,67
2,12	-1,31
2,68	-2,71
5,30	-0,28
7,19	0,62
7,81	-1,83
11,27	1,94
1,045	0,55
2,89	-2,38
5,855	0,35
8,955	-1,45
10,53	-0,94
14,76	3,82
Promedio de las diferencias	-0,65

Fuente: Elaboración propia.

ANEXO C: PROGRAMAS UTILIZADOS

Programa: Tiempo de respuesta de los sensores.

```
int lectura;
int lectura_ant;
long tiempo;
long tiempo1;
int cont=0;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  lectura=analogRead(A0);

  if(lectura>lectura_ant+10||lectura<lectura_ant-10){

    tiempo1=millis()-tiempo;
    //Serial.println("*****CAMBIO DE LECTURA*****");
    //Serial.println(tiempo1);
    cont=0;
    conteo();
  }
  else if(lectura<lectura_ant+10&&lectura>lectura_ant-10){
    cont++;
    conteo();

  }

  Serial.print("Lectura=");Serial.print(lectura);
  Serial.print("----");
  Serial.print("Lectura anterior=");
  Serial.print(lectura_ant);Serial.print("--Tiempo de cambio [ms]=");Serial.println(tiempo1);
}

void conteo(){
  if(cont==0){
    tiempo=millis();
    lectura_ant=lectura;
  }
  else{
```

```
}  
}
```

Programa: Lecturas RAW para calibración 1.

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
  
}  
  
void loop() {  
  int data=analogRead(A0);  
  Serial.println(data);  
  
}
```

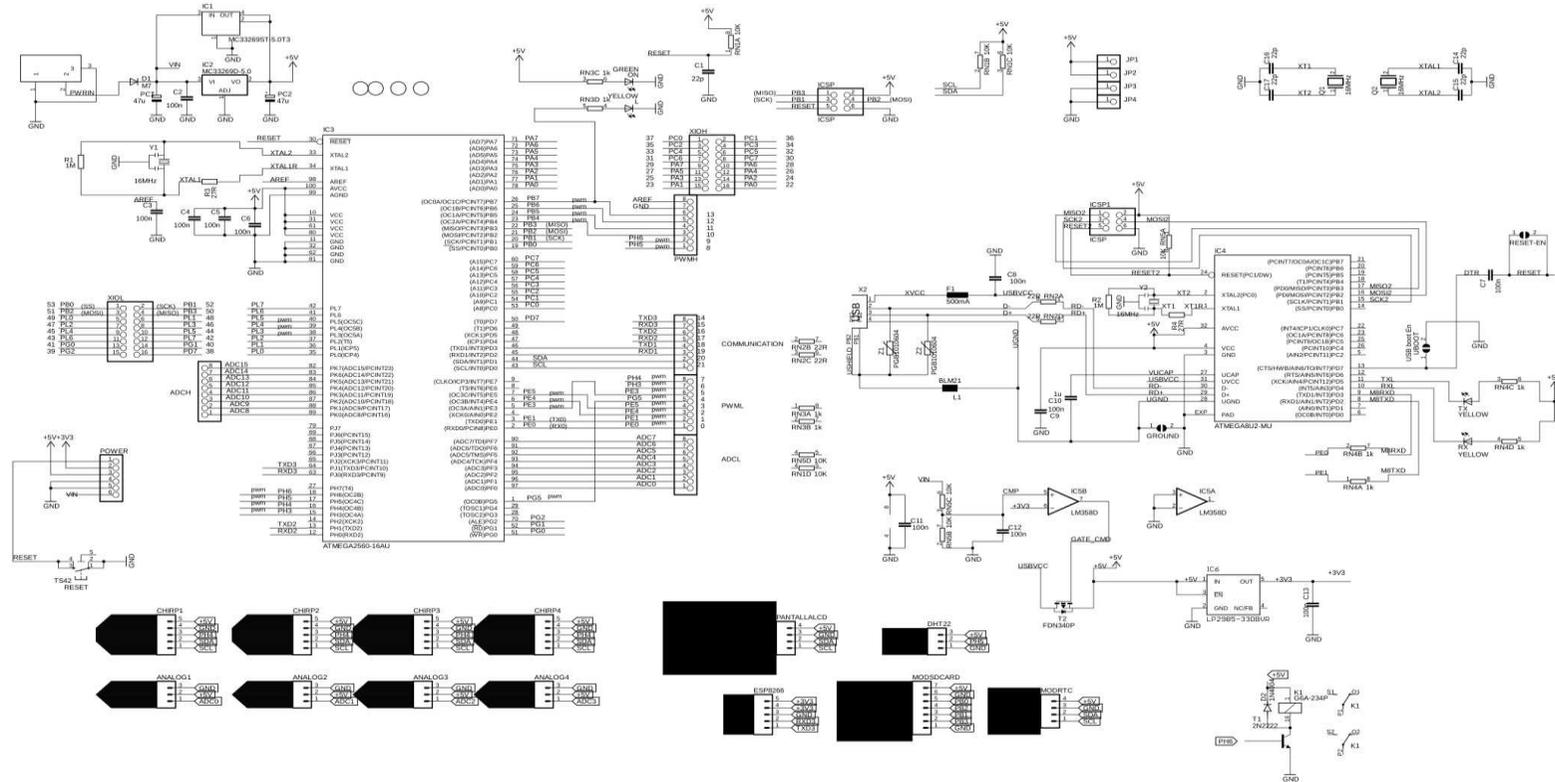
Programa: Lecturas RAW para calibración 2.

```
void setup() {  
  Serial.begin(9600);  
}  
  
void loop() {  
  int data1=analogRead(A0);  
  int data2=analogRead(A1);  
  int data3=analogRead(A2);  
  int data4=analogRead(A3);  
  int data5=analogRead(A4);  
  int data6=analogRead(A5);  
  int data7=analogRead(A6);  
  int data8=analogRead(A7);  
  int data9=analogRead(A8);  
  Serial.print("RAW1");  
  Serial.print(data1);  
  Serial.print(" ");  
  Serial.print("RAW2");  
  Serial.print(data2);  
  Serial.print(" ");  
}
```

```
Serial.print("RAW3");  
Serial.print(data3);  
Serial.print(" ");  
Serial.print("RAW4");  
Serial.print(data4);  
Serial.print(" ");  
Serial.print("RAW5");  
Serial.print(data5);  
Serial.print(" ");  
Serial.print("RAW6");  
Serial.print(data6);  
Serial.print(" ");  
Serial.print("RAW7");  
Serial.print(data7);  
Serial.print(" ");  
Serial.print("RAW8");  
Serial.print(data8);  
Serial.print(" ");  
Serial.print("RAW9");  
Serial.println(data9);  
}
```

ANEXO D: PLANOS

PLANO ELECTRÓNICO DE SISTEMA AUTOMÁTICO DE RIEGO



ANEXO E: HOJA TÉCNICA



HUMEDAD DE SUELO V1.2

Referencia AB142 Marca ROBOTIC

Valoración

15,00 Bs Impuestos incluidos

Cantidad 1

Añadir al carrito

Últimas unidades en stock

Compartir

SECURITY POLICY
(EDIT WITH THE CUSTOMER REASSURANCE MODULE)

DELIVERY POLICY
(EDIT WITH THE CUSTOMER REASSURANCE MODULE)

RETURN POLICY
(EDIT WITH THE CUSTOMER REASSURANCE MODULE)

DESCRIPCIÓN DETALLES DEL PRODUCTO RESEÑAS

DESCRIPCIÓN

El Sensor de humedad de suelo capacitivo v1.2 permite medir la humedad en el suelo utilizando el principio de capacitancia entre electrodos en lugar de resistencia, lo que aumenta considerablemente la vida útil del sensor. El electrodo posee una capa de protección anticorrosión para una mayor duración (no se oxida como el sensor resistivo). Compatible con Arduino, PIC, ESP8266/NodeMCU/NodeMCU-32. El sensor es ideal para monitorear el nivel de humedad de tus plantas y así recordar cuando necesitan ser regadas o incluso para realizar un sistema totalmente automatizado de riego añadiendo una válvula o una bomba de agua.

Voltaje de alimentación: 3.3V - 5V DC

Corriente operación: 5mA

Voltaje de la señal de salida: 0 a 5V (Analogico)

Modelo: capacitive soil moisture sensor v1.2

Vida útil: 3 años mín.

Conector: PH2 0-3P

Incluye: Electrodo y cable jumper hembra

Dimensiones: 98*23 mm

Peso: 18 gramos

Conexiones

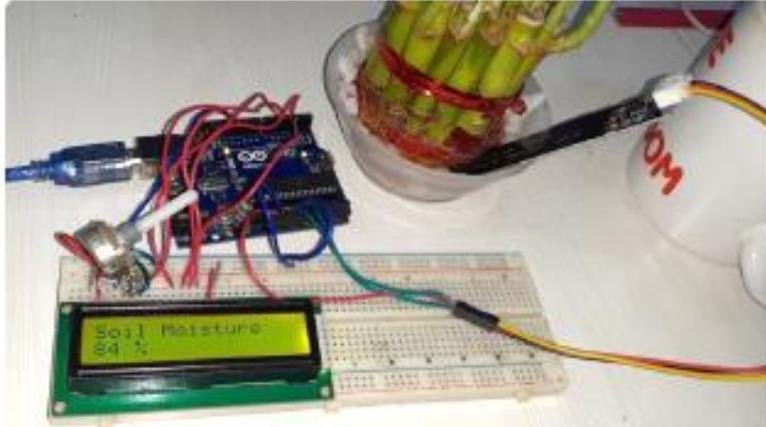
GND: Tierra (GND 0V)

VCC: Voltaje de alimentación (3.3V - 5V DC)

AOUT: Salida analógica

Interface Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2 with Arduino

By Admin — Updated: November 15, 2020 — 13 Comments — 6 Min Read



• ELECTRONIC COMPONENTS DISTRIBUTOR

3000+ Original brands

600K+ in Stock Parts

Enquiry Now



In this project, we are going to interface **Capacitive Soil Moisture Sensor with Arduino & 16x2 LCD Display** & display the soil moisture value in percentage (%) both In Serial Monitor and LCD Display & OLED Display. We will learn the **calibration** method for displaying the correct value.

Overview

This project is about **Arduino and Capacitive Soil Moisture Sensor & LCD/OLED Interfacing Tutorial**. Soil moisture is basically the amount/content of water present in the soil. This can be measured using a **soil moisture sensor** either **resistive** or **capacitive**. Here we will use **Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2**. This sensor measures the volumetric content of water inside the soil and gives us the **moisture level** as output.

This soil moisture sensor measures soil moisture levels by **capacitive sensing** rather than **resistive sensing** like other sensors on the market. It is made of **corrosion-resistant material** which gives it excellent service life. Insert it into the soil around your plants and monitor the **real-time soil moisture data**. This module includes an onboard voltage regulator which gives it an operating voltage range of **3.3 ~ 5.5V**. It is perfect for **low-voltage microcontroller** with both **3.3V** and **5V** power supply.

Bill of Materials

The following are the components that you need for making this project. You can purchase all the components from Amazon.

S.N.	Components	Quantity	Purchase Links
1	Arduino UNO Board	1	Amazon AliExpress
2	Capacitive Soil Moisture Sensor	1	Amazon AliExpress
3	16x2 LCD Display	1	Amazon AliExpress
4	0.96" OLED Display	1	Amazon AliExpress
5	Connecting Wires	10	Amazon AliExpress
6	Breadboard	1	Amazon AliExpress

Capacitive Soil Moisture Sensor v1.2

Overview

This is an analog capacitive soil moisture sensor which measures soil moisture levels by capacitive sensing, i.e. capacitance is varied on the basis of water content present in the soil. The capacitance is converted into voltage level basically from 1.2V to 3.0V maximum. The advantage of Capacitive Soil Moisture Sensor is that they are made of a corrosion-resistant material giving it a long service life.



Features & Specifications

1. Supports 3-Pin Sensor Interface
2. Analog output
3. Operating voltage: DC 3.3-5.5V
4. Output Voltage: DC 0-3.0V
5. Interface: PH2.0-3P
6. Size: 58x16mm(3.9x0.63")

Capacitive Soil Moisture Sensor Schematic

The Hardware Schematic for Capacitive Soil Moisture Sensor is given below.

There is a fixed frequency oscillator that is built with a [555 Timer IC](#). The square wave generated is then fed to the sensor like a capacitor. To a square wave signal that capacitor, however, has a certain reactance, or for argument's sake a resistance that forms a [voltage divider](#) with a pure ohm type resistor (the 10k one on pin 3). The greater is the soil moisture, the higher the capacitance of the sensor. Consequently, there is a smaller reactance to the square wave, thus lowering the voltage on the signal line. The voltage on the Analog signal pin can be measured by an analog pin on the Arduino which represents the humidity in the soil.

To learn more about the sensor, check the [Capacitive Soil Moisture Sensor Datasheet](#).

Interface Capacitive Soil Moisture Sensor with Arduino

Now lets **interface the Capacitive Soil Moisture Sensor with Arduino** and display the analog value or soil moisture value In percentage. The [circuit diagram](#) for this is very simple.

Connect the VCC pin to 3.3V of Arduino and GND to GND. Similarly, connect the Analog output pin to A0 pin of Arduino.

Basic Source Code/Program

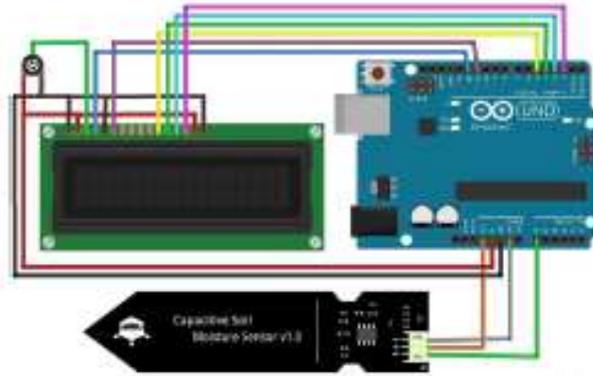
Here is a simple source code for **Interfacing Capacitive Soil Moisture Sensor with Arduino**. Copy the code from below and upload it to your Arduino board.

```
1 const int AirValue = 600; //you need to replace this value with Value_1
2 const int WaterValue = 300; //you need to replace this value with Value_2
3 int soilMoistureValue = 0;
4 int soilmoisturepercent=0;
5 void setup() {
6   Serial.begin(9600); // open serial port, set the baud rate to 9600 bps
7 }
8 void loop() {
9   soilMoistureValue = analogRead(A0); //put sensor insert into soil
10  Serial.println(soilMoistureValue);
11  soilmoisturepercent = map(soilMoistureValue, AirValue, WaterValue, 0, 100);
12  if(soilmoisturepercent >= 100)
13  {
14    Serial.println("100 %");
15  }
16  else if(soilmoisturepercent <=0)
17  {
18    Serial.println("0 %");
19  }
20  else if(soilmoisturepercent >0 && soilmoisturepercent < 100)
21  {
22    Serial.print(soilmoisturepercent);
23    Serial.println("%");
24  }
25 }
26 delay(250);
27 }
```

Once the code is uploaded you can click on serial monitor & check soil moisture value in percentage(%). Then test the soil moisture value by dipping the soil moisture sensor probe in water or in soil or any liquid.

Interface Capacitive Soil Moisture Sensor with Arduino & 16X2 LCD Display

Now lets interface the Capacitive Soil Moisture Sensor with Arduino & LCD Display and display the analog value or soil moisture value in percentage. The circuit diagram for this is very simple.



Connect the VCC pin to 3.3V of Arduino and GND to GND. Similarly, connect the Analog output pin to A0 pin of Arduino. Connect 1, 3, 16 pin of LCD to GND & connect 2, 15 to 5V VCC. Similarly connect pin-4, 6, 11, 12, 13, 14 of LCD to Arduino 12, 11, 5, 4, 3, 2 of Arduino.

Source Code/Program

Here is a simple source code for Interfacing Capacitive Soil Moisture Sensor with Arduino & 16x2 LCD Display. Copy the code from below and upload it to your Arduino board.

Source Code/Program

Here is a simple source code for Interfacing Capacitive Soil Moisture Sensor with Arduino & 16x2 LCD Display. Copy the code from below and upload it to your Arduino board.

```
1 #include <LiquidCrystal.h>
2 LiquidCrystal lcd(11, 11, 5, 4, 3, 2);
3
4 const int AirValue = 400; //you need to replace this value with Value_1
5 const int WaterValue = 250; //you need to replace this value with Value_2
6 int soilMoistureValue = 0;
7 int soilMoisturepercent=0;
8
9 void setup() {
10 Serial.begin(9600); // open serial port, set the baud rate to 9600 bps
11 lcd.begin(16, 2);
12 }
13
14 void loop() {
15 soilMoistureValue = analogRead(A0); //put sensor insert into soil
16 Serial.println(soilMoistureValue);
17 soilMoisturepercent = map(soilMoistureValue, AirValue, WaterValue, 0, 100);
18 if(soilMoisturepercent >= 100)
19 {
20 Serial.println("100 %");
21 lcd.setCursor(0, 0);
22 lcd.print("Soil Moisture");
23 lcd.setCursor(8, 1);
24 lcd.print("100 %");
25 delay(200);
26 lcd.clear();
27 }
28
29 else if(soilMoisturepercent <=0)
30 {
31 Serial.println("0 %");
32 lcd.setCursor(0, 0);
33 lcd.print("Soil Moisture");
34 lcd.setCursor(8, 1);
35 lcd.print("0 %");
36 delay(200);
37 lcd.clear();
38 }
39
40 else if(soilMoisturepercent >0 as soilMoisturepercent < 100)
41 {
42 Serial.print(soilMoisturepercent);
43 Serial.println("%");
44 lcd.setCursor(0, 0);
45 lcd.print("Soil Moisture");
46 lcd.setCursor(8, 1);
47 lcd.print(soilMoisturepercent);
48 lcd.print(" %");
49 delay(250);
50 lcd.clear();
51 }
52 }
```

Once the code is uploaded you can LCD starting to display the soil moisture value in percentage(%). Then test the soil moisture value by dipping the soil moisture sensor probe in water or in soil or any liquid.

Interface Capacitive Soil Moisture Sensor with OLED Display & Arduino

Now lets interface the Capacitive Soil Moisture Sensor with OLED Display & Arduino and display the analog value or soil moisture value in percentage. The circuit diagram for this is very simple.

Source Code/Program

Here is a simple source code for Interfacing Capacitive Soil Moisture Sensor with OLED Display & Arduino. Copy the code from below and upload it to your Arduino board.

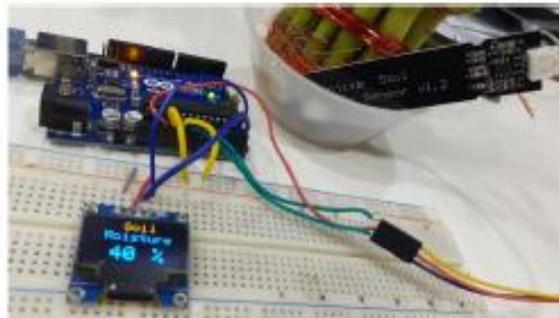
```

1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_GFX.h>
3 #include <Adafruit_SSD1306.h>
4
5 #define OLED_RESET 4
6 Adafruit_SSD1306 display(OLED_RESET);
7
8 const int AirValue = 450; //you need to replace this value with Value_1
9 const int WaterValue = 310; //you need to replace this value with Value_2
10 int soilMoistureValue = 0;
11 int soilMoisturepercent=0;
12
13 void setup() {
14   Serial.begin(9600); // open serial port, set the baud rate to 9600 bps
15   display.begin(SSD1306_SWITCHCAPVCC, 128); //initialize with the I2C addr 0x3C (128x64)
16   display.clearDisplay();
17 }
18
19 void loop() {
20   soilMoistureValue = analogRead(A0); //put Sensor insert into soil
21   Serial.println(soilMoistureValue);
22   soilMoisturepercent = map(soilMoistureValue, AirValue, WaterValue, 0, 100);
23   if(soilMoisturepercent >= 100)
24   {
25     Serial.println("100 %");
26
27     display.setCursor(15,0); //oled display
28     display.setTextSize(2);
29     display.setTextColor(WHITE);
30     display.println("Soil");
31     display.setCursor(20,15);
32     display.setTextSize(2);
33     display.setTextColor(WHITE);
34     display.println("Moisture");
35
36     display.setCursor(30,40); //oled display
37     display.setTextSize(2);
38     display.setTextColor(WHITE);
39     display.println("100 %");
40     display.display();
41
42     delay(250);
43     display.clearDisplay();
44   }
45   else if(soilMoisturepercent <=0)
46   {
47     Serial.println("0 %");
48
49     display.setCursor(15,0); //oled display
50     display.setTextSize(2);
51     display.setTextColor(WHITE);
52     display.println("Soil");
53     display.setCursor(20,15);
54     display.setTextSize(2);
55     display.setTextColor(WHITE);
56     display.println("Moisture");
57
58     display.setCursor(30,40); //oled display
59     display.setTextSize(2);
60     display.setTextColor(WHITE);
61     display.println("0 %");
62     display.display();
63
64     delay(250);
65     display.clearDisplay();
66   }
67   else if(soilMoisturepercent >0 && soilMoisturepercent < 100)
68   {
69     Serial.print(soilMoisturepercent);
70     Serial.println("%");
71
72     display.setCursor(15,0); //oled display
73     display.setTextSize(2);
74     display.setTextColor(WHITE);
75     display.println("Soil");
76     display.setCursor(20,15);
77     display.setTextSize(2);
78     display.setTextColor(WHITE);
79     display.println("Moisture");
80

```

```
79 display.setCursor(20,40); //oled display
80 display.setTextSize(3);
81 display.setTextColor(WHITE);
82 display.println(soilmoisturepercent);
83 display.setCursor(70,40);
84 display.setTextSize(3);
85 display.println(" %");
86 display.display();
87
88 delay(250);
89 display.clearDisplay();
90
91 |
```

Once the code is uploaded the OLED Display will start showing the soil moisture value in percentage(%). Then test the soil moisture value by dipping the soil moisture sensor probe in water or in soil or any liquid.



Capacitive Soil Moisture Sensor Calibration

While talking about the accuracy, the capacitive soil moisture sensor is not so much accurate as expected. But you can do the calibration to get the closest accurate reading. Just upload the simple code to Arduino and check the sensor analog reading when the sensor is in dry air and when the sensor is in water. From here you can find the maximum and minimum analog values that can be mapped to percentage values from 0 to 100% as per the program.

```
1 constantAirValue = 600; //you need to replace this value with Value_1
2 constantWaterValue = 350; //you need to replace this value with Value_2
```

From above change the **AirValue** and **WaterValue** with the value you got.



DIRECCIÓN DE DERECHO DE AUTOR
Y DERECHOS CONEXOS
RESOLUCIÓN ADMINISTRATIVA NRO. 1-2607/2024
La Paz, 26 de agosto de 2024

VISTOS:

La solicitud de Inscripción de Derecho de Autor presentada en fecha **20 de agosto de 2024**, por **ALEJANDRO ROGER SARAVIA QUISPE** con C.I. N° **8302712 LP**, con número de trámite **DA-E 300174/2024**, señala la pretensión de inscripción de la Tesis de Post-grado titulada: **"EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS PARA UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMÁTICO CASO: LABORATORIO DE RIEGO, FACULTAD DE AGRONOMÍA, U.M.S.A."**, cuyos datos y antecedentes se encuentran adjuntos y expresados en el Formulario de Declaración Jurada.

CONSIDERANDO:

Que, en observación al Artículo 4º del Decreto Supremo N° 27938 modificado parcialmente por el Decreto Supremo N° 28152 el *"Servicio Nacional de Propiedad Intelectual SENAPI, administra en forma desconcentrada e integral el régimen de la Propiedad Intelectual en todos sus componentes, mediante una estricta observancia de los regímenes legales de la Propiedad Intelectual, de la vigilancia de su cumplimiento y de una efectiva protección de los derechos de exclusiva referidos a la propiedad industrial, al derecho de autor y derechos conexos; constituyéndose en la oficina nacional competente respecto de los tratados internacionales y acuerdos regionales suscritos y adheridos por el país, así como de las normas y regímenes comunes que en materia de Propiedad Intelectual se han adoptado en el marco del proceso andino de integración"*.

Que, el Artículo 16º del Decreto Supremo N° 27938 establece *"Como núcleo técnico y operativo del SENAPI funcionan las Direcciones Técnicas que son las encargadas de la evaluación y procesamiento de las solicitudes de derechos de propiedad intelectual, de conformidad a los distintos regímenes legales aplicables a cada área de gestión"*. En ese marco, la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos otorga registros con carácter declarativo sobre las obras del ingenio cualquiera que sea el género o forma de expresión, sin importar el mérito literario o artístico a través de la inscripción y la difusión, en cumplimiento a la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, Ley de Derecho de Autor N° 1322, Decreto Reglamentario N° 23907 y demás normativa vigente sobre la materia.

Que, la solicitud presentada cumple con: el Artículo 6º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, el Artículo 26º inciso a) del Decreto Supremo N° 23907 Reglamento de la Ley de Derecho de Autor, y con el Artículo 4º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina.

Que, de conformidad al Artículo 18º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor en concordancia con el Artículo 18º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina, referentes a la duración de los Derechos Patrimoniales, los mismos establecen que: *"la duración de la protección concedida por la presente ley será para toda la vida del autor y por 50 años después de su muerte, a favor de sus herederos, legatarios y cesionarios"*

Que, se deja establecido en conformidad al Artículo 4º de la Ley N° 1322 de Derecho de Autor, y Artículo 7º de la Decisión 351 Régimen Común sobre Derecho de Autor y Derechos Conexos de la Comunidad Andina que: *"...No son objeto de protección las ideas contenidas en las obras literarias, artísticas, o el contenido ideológico o técnico de las obras científicas ni su aprovechamiento industrial o comercial"*

Que, el artículo 4, inciso e) de la ley N° 2341 de Procedimiento Administrativo, instituye que: *"... en la relación de los particulares con la Administración Pública, se presume el principio de buena"*



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telfs.: 2115700
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs.: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs.: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 5B,
Zona 16 de Julio.
Telfs.: 2141001 - 72043029

Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
casi esq. Uriolagoitia,
Zona Parque Bolívar.
Telf.: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calle Ciro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf.: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre, N° 5837,
entre Ayacucho
y Junin, Galería Central,
Of. 14.
Telf.: 67201288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.
Telf.: 72018160

www.senapi.gob.bo





ESTADO PLURINACIONAL DE BOLIVIA

MINISTERIO DE DESARROLLO PRODUCTIVO Y ECONOMÍA PLURAL

fe. La confianza, la cooperación y la lealtad en la actuación de los servidores públicos y de los ciudadanos ...", por lo que se presume la buena fe de los administrados respecto a las solicitudes de registro y la declaración jurada respecto a la originalidad de la obra.

POR TANTO:

El Director de Derecho de Autor y Derechos Conexos sin ingresar en mayores consideraciones de orden legal, en ejercicio de las atribuciones conferidas.

RESUELVE:

INSCRIBIR en el Registro de Tesis, Proyectos de Grado, Monografías y Otras Similares de la Dirección de Derecho de Autor y Derechos Conexos, la Tesis de Post-grado titulada: "EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA EN LA RECOLECCIÓN DE DATOS PARA UN SISTEMA DE RIEGO AUTOMÁTICO CASO: LABORATORIO DE RIEGO, FACULTAD DE AGRONOMÍA, U.M.S.A." a favor del autor y titular: **ALEJANDRO ROGER SARAVIA QUISPE** con C.I. N° **8302712 LP**, quedando amparado su derecho conforme a Ley, salvando el mejor derecho que terceras personas pudieren demostrar.

Regístrese, Comuníquese y Archívese.

CASA/lm

Firmado Digitalmente por:

Servicio Nacional de Propiedad Intelectual - SENAPI

CARLOS ALBERTO SORUCO ARROYO

DIRECTOR DE DERECHO DE AUTOR Y DERECHOS CONEXOS

LA PAZ - BOLIVIA

Firma:



8Pr5e8Cj4Ce63G

PARA LA VALIDACIÓN DEL PRESENTE DOCUMENTO INGRESAR A LA PÁGINA WEB www.senapi.gob.bo/verificacion Y COLOCAR CÓDIGO DE VERIFICACIÓN O ESCANEAR CÓDIGO QR.



Oficina Central - La Paz
Av. Montes, N° 515,
entre Esq. Uruguay y
C. Batallón Illimani.
Telfs: 2115700
2119276 - 2119251

Oficina - Santa Cruz
Av. Uruguay, Calle
prolongación Quijarro,
N° 29, Edif. Bicentenario.
Telfs: 3121752 - 72042936

Oficina - Cochabamba
Calle Bolívar, N° 737,
entre 16 de Julio y Antezana.
Telfs: 4141403 - 72042957

Oficina - El Alto
Av. Juan Pablo II, N° 2560
Edif. Multicentro El Ceibo
Ltda. Piso 2, Of. 5B,
Zona 16 de Julio.
Telfs: 2141001 - 72043029

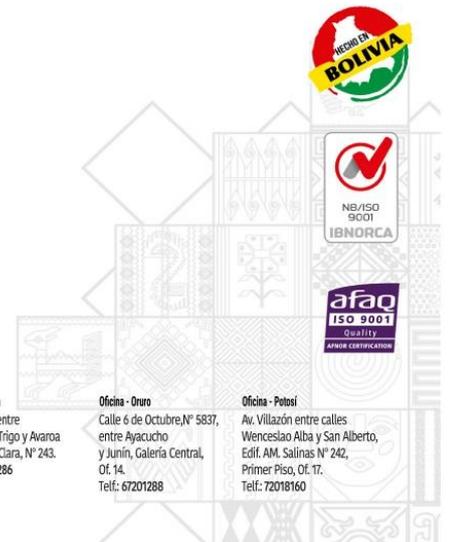
Oficina - Chuquisaca
Calle Kilómetro 7, N° 366
casi esq. Urmilagoitia,
Zona Parque Bolívar.
Telf: 72005873

Oficina - Tarija
Av. La Paz, entre
Calles Ciro Trigo y Avaroa
Edif. Santa Clara, N° 243.
Telf: 72015286

Oficina - Oruro
Calle 6 de Octubre, N° 5837,
entre Ayacucho
y Junín, Galería Central,
Of. 14.
Telf: 67201288

Oficina - Potosí
Av. Villazón entre calles
Wenceslao Alba y San Alberto,
Edif. AM. Salinas N° 242,
Primer Piso, Of. 17.
Telf: 72018160

www.senapi.gob.bo



**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA MECÁNICA Y
ELECTROMECAÁNICA**

NOMBRE: ING. ALEJANDRO ROGER SARAVIA QUISPE

CORREO: alejandrosmc22@gmail.com

C.I.: 8302712 L.P.

Cel: 79682641