

CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA DE UNA ESTRUCTURA DE BIORRETENCIÓN ESTÁNDAR, SIN  
VEGETACIÓN, PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESPESOR ÓPTIMO DE LA CAPA DE  
ALMACENAMIENTO PARA UN EVENTO DE LLUVIA TÍPICO DE UNA ZONA URBANA DE  
BOGOTÁ

ING. FRANK DAVID VELASCO ÁVILA

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE  
BOGOTÁ  
2016

CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA DE UNA ESTRUCTURA DE BIORRETENCIÓN ESTÁNDAR, SIN  
VEGETACIÓN, PARA LA DETERMINACIÓN DEL ESPESOR ÓPTIMO DE LA CAPA DE  
ALMACENAMIENTO PARA UN EVENTO DE LLUVIA TÍPICO DE UNA ZONA URBANA DE  
BOGOTÁ

ING. FRANK DAVID VELASCO ÁVILA

Tesis para Optar al Título de Magíster en Ingeniería Civil  
con Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente

Director: Msc. Germán Eduardo Acero Riveros

Asesores:

PhD. Rafael Angulo Jaramillo

Msc. William Ricardo Aguilar Piña

ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL  
RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE  
BOGOTÁ  
2016

“Todas las leyes de la Naturaleza existen dentro de uno mismo, y si no las encontramos dentro de sí mismos,  
no las encontraremos fuera de sí mismos jamás”

*V. M. Samael Aun Weor.*

Nota de aceptación:

La tesis de maestría titulada “Calibración Hidrodinámica de una Estructura de Biorretención Estándar, sin Vegetación, para la Determinación del Espesor Óptimo de la Capa de Almacenamiento para un Evento de Lluvia Típico de una Zona Urbana de Bogotá”, presentada por Frank David Velasco Ávila, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.

Director de la Tesis

---

GERMÁN EDUARDO ACERO RIVEROS

Jurado

---

GERMÁN RICARDO SANTOS GRANADOS

Jurado

---

RAFAEL ANGULO JARAMILLO

Bogotá, domingo, 30 de octubre de 2016.

Dedicatoria:

Dedico este trabajo a mi amigo *Rex*, quien, en su corta existencia, me enseñó que por un instante de verdadero amor, de amor dorado Crístico, valdría la pena vivir toda una vida de amargo sufrimiento. Porque la muerte es igualmente un comienzo, y así como la vida, la muerte también nos enseña a amar.

A Mónica, por ser la media cordura que completa mi locura.

### Agradecimientos:

Agradezco especialmente a William Ricardo Aguilar Piña, quién gracias a su valiosa admiración por los colores me enseñó a ver la indubitable verdad que encierra el blanco y negro.

A César Augusto Collazos Morales, por su valiosa amistad y sus enseñanzas en el camino vertical del arcano.

Al Dr. Rafael Angulo, por todo su apoyo durante estos años, por ser un guía y por compartir humildemente su valiosa experiencia en la interpretación del flujo en la zona vadosa y su pasión por la fotografía.

Agradezco al ingeniero Germán Acero Riveros, por confiar en mi curiosidad.

Agradezco al ingeniero Héctor Matamoros, por contagiarme de su pasión por la hidráulica.

Agradezco a todas las personas que me apoyaron durante estos años, entre ellos: PhD. Germán Ricardo Santos Granados director del programa de Maestría de la Escuela, ingeniera Mónica Andrea Vargas Solla profesor de Mecánica de fluidos de la Escuela, John Jairo Arias del laboratorio de hidráulica, ingeniero Alejandro Gómez Martínez del laboratorio de hidráulica, ingeniero Alfonso Rodríguez Díaz director del laboratorio de Hidráulica, Edgar contreras del laboratorio de geotecnia, ingeniera Sandra Campagnoli Director del laboratorio de geotecnia, PhD. Nancy Torres Director del laboratorio de materiales, bióloga Gladys Rocío Gonzales del laboratorio de ingeniería ambiental y finalmente, al ingeniero Jesús Barrera profesor de Señales y sistemas de la Escuela Colombiana de Ingeniería.

## CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN .....	15
ABSTRACT .....	16
OBJETIVOS .....	18
1. SISTEMAS DE BIORRETENCIÓN .....	19
1.1. DEFINICIÓN .....	19
1.1.1. Sistemas de infiltración y retención .....	21
1.1.2. Jardines de lluvia .....	22
1.1.3. Canales Vegetados .....	22
1.1.4. Pavimentos Permeables .....	23
1.1.5. Sistemas Prefabricados .....	24
1.1.6. Ventajas .....	24
1.1.7. Desventajas .....	25
1.1.8. Aplicación .....	25
1.2. TÉCNICAS DE DIMENSIONAMIENTO .....	26
1.2.1. Criterios de dimensionamiento manual CIRIA (CIRIA, 2007) .....	26
1.2.1.1. Área superficial .....	28
1.2.1.2. Geometría .....	28
1.2.1.3. Materiales .....	29
1.2.2. Criterios de dimensionamiento EPA (EPA, 2004b) .....	29
1.2.3. Sistema de Biorretención en Vías .....	30
1.2.3.1. Área superficial de almacenamiento: .....	32
1.2.4. Dimensionamiento del Sistema de Biorretención Estándar .....	33
1.2.4.1. Altura de almacenamiento de agua sobre la estructura .....	34
1.2.4.2. Dimensionamiento de la Superficie de Biorretención .....	35
1.2.4.3. Espesor de las Capas de Suelo .....	42
1.2.4.4. Selección de los Suelos .....	42
1.2.4.5. Elementos del Sistema de Biorretención .....	46
1.2.4.6. Geometría del Sistema .....	47
1.2.4.7. Detalles constructivos .....	54
2. ANTECEDENTES GENERALES .....	56
3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS .....	58
3.1. Descripción de suelos .....	58
3.2. Granulometría .....	58
3.3. Densidades .....	61
3.4. Porosidad y $\theta_s$ .....	64
3.5. Mezcla de suelos .....	64
3.6. Clasificación USDA de los Suelos .....	67
4. PILOTO EXPERIMENTAL PARA LA CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA ESTRUCTURA .....	68
4.1. COLUMNA DE SUELO .....	68

4.2. SISTEMA AUTOMATIZADO DE CAPTURA DE DATOS.....	73
4.2.1. PLC Arduino Mega.....	75
4.2.2. Alimentación Eléctrica del Sistema .....	75
4.2.3. Interface y Presentación de Datos en LAB VIEW .....	76
4.3. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE CAUDALES .....	77
4.4. CONSTRUCCIÓN DE TENSIÓMETROS .....	79
4.5. CONSTRUCCIÓN DE MEDIDORES DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA .....	88
4.6. CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DE TEMPERATURA .....	91
4.7. MEDIDORES DE CAUDALES .....	92
4.8. CALIBRACIÓN DE TENSIÓMETROS .....	93
4.8.1. Llenado y Verificación del Funcionamiento de los Tensiómetros .....	95
4.9. CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES PARA LA MEDICIÓN DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA .....	96
4.9.1. Método Continuo:.....	96
4.9.2. Método Discreto: .....	99
4.10. CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE TEMPERATURA .....	106
4.11. CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE CAUDALES.....	107
4.12. RESUMEN GENERAL DE LAS ECUACIONES DE CALIBRACIÓN PARA LA INSTRUMENTACIÓN .....	111
4.12.1. Medidores de contenido volumétrico de agua .....	111
4.12.2. Tensiómetros.....	111
4.12.3. Medidores de caudal .....	111
4.12.4. Medidor de temperatura.....	112
4.13. INSTALACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE LA COLUMNA DE SUELO.....	112
4.13.1. Llenado de la Columna de Suelo .....	115
4.13.2. Instalación de Instrumentos .....	117
4.13.3. Prueba de lectura y de Captura de Datos en Régimen Permanente .....	117
5. MODELO DE COLUMNA DE SUELO Y CAPTURA DE DATOS.....	121
5.1. Mediciones en Régimen Permanente .....	122
5.1.1. Análisis Estadístico de las Mediciones .....	128
6. FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA.....	130
6.1. Curva de Retención de agua $\theta$ .....	131
6.2. Conductividad hidráulica.....	132
6.3. HYDRUS 1D .....	133
7. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA ESTRUCTURA MODELACIÓN INVERSA HYDRUS 1D	135
7.1. Modelo Directo para la Estimación, por Prueba y Error, de los Parámetros de van Genuchten-Mualem Semilla para el Modelo Inverso.....	136
7.2. Modelo Inverso Usando Hydrus 1D.....	143
7.3. Resultados del Modelo Inverso Utilizando Curva $h(t)$ , Curva $\theta(t)$ y Caudal de Salida .....	158
8. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ÓPTIMO DE ALMACENAMIENTO HYDRUS 1D .....	163
8.1. Definición del Modelo Directo para la Condición de Almacenamiento Admisible en la Estructura.....	163
8.1.1. Resultados y Análisis .....	170
9. EJEMPLO DE APLICACIÓN EN ZONA URBANA DE BOGOTÁ.....	175
9.1. Hidrología de la Zona.....	175



9.1.1. Área aferente .....	176
9.1.2. Método racional .....	177
9.2. Modelo Directo Hydrus 1D .....	178
9.2.1.1. Resultados sin tener en Cuenta la Capa de Almacenamiento.....	180
9.2.1.2. Resultados Teniendo en Cuenta la Capa de Almacenamiento.....	182
9.2.1.3. Comparación de Resultados y Análisis .....	184
9.2.1.4. Discusión Acerca de la Amortiguación del Hidrograma de Entrada .....	186
CONCLUSIONES .....	188
RECOMENDACIONES .....	193
INVESTIGACIÓN FUTURA .....	194
REFERENCIAS .....	195
ANEXOS .....	199

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Componentes del sistema de Biorretención (CIRIA, 2007).....	26
Tabla 2. Consideraciones generales del uso de áreas de Biorretención.....	27
Tabla 3. Porcentaje de suelos capa de cobertura.....	29
Tabla 4. Dimensiones recomendadas para sistemas de Biorretención (EPA, 1999).....	32
Tabla 5. Altura de Almacenamiento Máxima usando la Clasificación USDA (FAO, 2009, p. 39).....	34
Tabla 6. Criterios de Dimensionamiento Biorretención (Lucas, 2005, p. A-4).....	37
Tabla 7. Medio Filtrante en Sistemas de Biorretención.....	43
Tabla 8. Sensibilidad del Contenido de Humedad en los Suelos (Allerton & Pittner, 2010, p. 19).....	45
Tabla 9. Cálculo de Propiedades Geométricas de la Cuneta A-120.....	51
Tabla 10. Cálculo del Caudal Máximo.....	51
Tabla 11. Vertedero de Excesos.....	53
Tabla 12. Dimensionamiento del Sedimentador.....	53
Tabla 13. Ensayo de Granulometría para la Arena (cama de arena).....	58
Tabla 14. Ensayo de Granulometría para la Mezcla Arena-Tierra (Suelo de Plantación).....	60
Tabla 15. Ensayo para determinar las densidades de la Arena.....	62
Tabla 16. Ensayo para determinar la Densidad Bulk de la Arena.....	62
Tabla 17. Ensayo para Determinar las Densidades del Suelo de Plantación.....	63
Tabla 18. Ensayo para determinar la Densidad Bulk del suelo de Plantación.....	63
Tabla 19. Cálculo de la Porosidad de los Suelos.....	64
Tabla 20. Cálculo de la Densidad Seca/bulk Para el diseño de la Mezcla del suelo de Plantación.....	64
Tabla 21. Cálculo de Cantidades de Suelo.....	65
Tabla 22. Cálculo de Cantidades Para la Mezcla del Suelo de Plantación.....	65
Tabla 23. Límites de Clasificación para Arenas, Limos y Arcillas USDA.....	67
Tabla 24. Porcentajes de Arena, Limo y Arcilla para la Clasificación USDA.....	67
Tabla 25. Calibración de los Sensores de Presión MPX_2102AP.....	95
Tabla 26. Calibración Sensor Resistivo $\theta_1$ .....	103
Tabla 27. Calibración Sensor Resistivo $\theta_2$ .....	104
Tabla 28. Calibración Sensor Resistivo $\theta_3$ .....	105
Tabla 29. Calibración Sensor Resistivo $\theta_4$ y $\theta_5$ .....	106
Tabla 30. Calibración del Sensor de Temperatura (LM-45).....	107
Tabla 31. Calibración del Medido de Caudal de Entrada.....	107
Tabla 32. Calibración del Tanque para la Medición del Caudal de Salida.....	110
Tabla 33. Estabilidad del Caudal de Entrada para el Primer Experimento.....	123
Tabla 34. Estabilidad del Caudal de Entrada para el Segundo Experimento.....	123
Tabla 35. Estabilidad del Caudal de Entrada para el Tercer Experimento.....	124
Tabla 36. Definición del Modelo Directo Inicial en Hydrus 1D.....	136
Tabla 37. Resultados Modelo Directo.....	142
Tabla 38. Flujo de Entrada Para el Modelo Inverso.....	143
Tabla 39. Datos de Entrada: Curvas $h(t)$ , $\theta(t)$ y $h(\theta)$ .....	144
Tabla 40. Definición General del Modelo Inverso en Hydrus 1D.....	147
Tabla 41. Datos de Entrada para el Modelo Inverso.....	155
Tabla 42. Resultados del Modelo Inverso.....	158
Tabla 43. Criterio de Akaike.....	162
Tabla 44. Modelo Directo para Determinar el Flujo en la Estructura Condición de Carga de 0.10 m.c.a.....	163
Tabla 45. Resultados y Análisis Cálculo del Volumen de Almacenamiento.....	170
Tabla 46. Curvas IDF para la Zona de Estudio.....	175
Tabla 47. Generación de Hietograma para Tr 10 Años.....	175
Tabla 48. Hidrograma de Entrada.....	177
Tabla 49. Definición del Modelo Directo con Hidrograma de Entrada.....	178
Tabla 50. Resultados Modelo Directo Con Hidrograma de Entrada sin Capa de Almacenamiento.....	180
Tabla 51. Resultados y Análisis Teniendo en Cuenta la Capa de Almacenamiento.....	182

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Esquema Típico Biorretención (Monash University, 2009, p. 7).....	19
Figura 2. Pozo de Infiltración (García Haba, 2011, p. 63) .....	21
Figura 3. Estaque de retención .....	22
Figura 4. Rain Garden (EPA, 2004b).....	22
Figura 5. Bioswale Usado en Drenaje Rural.....	23
Figura 6. Pavimento Permeable (García Haba, 2011, p. 91).....	23
Figura 7. Sección Típica de Pavimentos Permeables (García Haba, 2011, p. 74).....	24
Figura 8. Sistema Prefabricado de Biorretención (Allerton & Pittner, 2010, p. 63).....	24
Figura 9. Sección típica biorretención (CIRIA, 2007).....	27
Figura 10. Esquema típico en planta Biorretención (EPA, 2004b, pp. 7–7).....	31
Figura 11. Esquema Típico de Captación Biorretención (EPA, 2004b, pp. 7–8).....	31
Figura 12. Detalle de Combinación de Áreas Duras y Blandas B165 (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007).....	36
Figura 13. Diseño del Suelo Estructura Propuesta.....	45
Figura 14. Elementos Prefabricados para el Drenaje en Vías A-10, A-121 y A-125 (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007, p. 19,51,55).....	46
Figura 15. Elemento A-120 para Cuneta (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007) .....	48
Figura 16. Capacidad Hidráulica de la Calle (Leidy Franco, 2015).....	49
Figura 17. Geometría de la Cuneta A-120 para un Ancho Admisible de Inundación T=1.50 m .....	50
Figura 18. Elemento A 128 (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007, p. 56).....	52
Figura 19. Esquema General en Planta de la Estructura Propuesta .....	54
Figura 20. Esquema General en Corte de la Estructura Propuesta.....	55
Figura 21. Curva Granulométrica para la Arena.....	59
Figura 22. Curva Granulométrica para el Suelo de Plantación.....	61
Figura 23. Proceso de Mezclado del Suelo.....	66
Figura 24. Triángulo de Texturas del USDA .....	67
Figura 25 Estructura de Soporte de la Columna de Suelo .....	68
Figura 26. Soporte en Acero.....	69
Figura 27. Elementos en la Descarga de la Columna de Suelo.....	69
Figura 28. Prueba Visual de Distribución de Gotas en la Descarga.....	70
Figura 29. Nivelación de la Columna de Suelo .....	70
Figura 30. Esquema Columna de Suelo .....	71
Figura 31. Esquemático del Montaje de Columna de Suelo.....	72
Figura 32. Proceso de Construcción de la Caja de Control y Recepción de señales .....	73
Figura 33. Caja de Recepción de Señales.....	74
Figura 34. Apantallamiento con Aluminio en la Caja de Recepción de Señales .....	74
Figura 35. Cables utilizados para el transporte de las señales .....	74
Figura 36. PLC Arduino MEGA.....	75
Figura 37. Baterías y Fuente Reguladora en la Caja de Recepción de Señales.....	76
Figura 38. Interface en LAB VIEW para Visualización de Datos.....	76
Figura 39. Bomba y Válvula Atomizadora.....	77
Figura 40. Tanque de Almacenamiento de Agua Nivel Constante.....	78
Figura 41. Tanque de Recolección de Volúmenes en la Salida de la Columna de Suelo .....	78
Figura 42. Sistema de Tubos para la Alimentación de Caudales .....	78
Figura 43. Esquema General de un Tensiómetro.....	79
Figura 44. Sensor de presión MPX 2102AP .....	80
Figura 45. Esquema del Circuito Amplificador para Sensores de presión, tomado de: (Oxer & Blemings, 2009) modificado, re-escrito y editado por el autor. ....	80

Figura 46. PCB para el amplificador de los sensores de presión MPX2102AP/ MPX2010DP .....	81
Figura 47. Proceso de diseño de la PCB Amplificador para Tensiómetro .....	81
Figura 48. Caja para el Transductor de Presión .....	82
Figura 49. Conector RJ-11, Tubo Termo-encogible y regletas .....	82
Figura 50. Preparación de la PCB para el Soldado de Conectores .....	82
Figura 51. Detalle del Proceso Constructivo de la Caja del Transductor de Presión Soldado de Conectores ....	83
Figura 52. Detalle del Proceso Constructivo de la Caja del Transductor de Presión Pegado del Enchufe y Conector Rj-11.....	84
Figura 53. Detalle del Proceso Constructivo de la Caja del Transductor de Presión Acople de PCB y Atornillado del Sensor de Presión .....	84
Figura 54. Detalle del Proceso Constructivo de la Caja del Transductor de Presión y Presentación Final del Transductor de Presión .....	85
Figura 55. Racor de Cierre Rápido y Manguera para Acople.....	86
Figura 56. Racor de Bronce 1/2"-1/4" y 1/4"-1/8" Acoplados con Union Roscada a Tubería de PVC .....	86
Figura 57. Cápsula Porosa para Tensiómetro.....	87
Figura 58. Esquema del Soporte Metálico para Tensiómetro (Dim. (mm)).....	87
Figura 59. Resultado Final del Tensiómetro Propuesto.....	88
Figura 60. Esquema General de un Electrodo (Calderon, 2014).....	89
Figura 61. Construcción de Medidores de Humedad en el Suelo .....	90
Figura 62. Módulos YL-38 para Arduino .....	90
Figura 63. Sensor LM35 para Medición de Temperatura .....	91
Figura 64. Medidor de Temperatura .....	91
Figura 65. Sensor de Flujo YF-S201 .....	92
Figura 66. Sensor de Flujo YF-S401 (4.5 ml/s – 100 ml/s) .....	92
Figura 67. Accesorio Construido para el Acople Entre el Vacuómetro, Bomba de Vacío y Sensores .....	93
Figura 68. Proceso de Llenado de Tensiómetros .....	96
Figura 69. Muestra de Suelo Para el Monitoreo de la Humedad.....	97
Figura 70. Montaje para la Captura de Datos. ....	97
Figura 71. Proceso de Calibración Puntual de Higrómetros.....	101
Figura 72. Tanque Para la Medición del Caudal de Salida .....	110
Figura 73. Acople de los Tensiómetros en la Columna de Suelo.....	113
Figura 74. Acople de Higrómetros a la Columna de Suelo .....	114
Figura 75. Nivelación y Sujeción del soporte y Tubo a la Pared .....	114
Figura 76. Proceso de Sellado con Silicona.....	115
Figura 77. Proceso de Acomodación del Suelo Dentro de la Columna.....	116
Figura 78. Instalación y Nivelación de Falsos Tensiómetros.....	116
Figura 79. Esquema de la Instalación de Instrumentos para Prueba de Funcionamiento .....	118
Figura 80. Curvas de Retención de la Primera Prueba de Funcionamiento de la Columna .....	119
Figura 81. inicio de la Medición de la Prueba de Funcionamiento para Condiciones Permanentes .....	119
Figura 82. Frente de Humedad Cruza el Primer Punto de Medición .....	120
Figura 83. Montaje de Columna de Suelo en Proceso de Toma de Datos.....	121
Figura 84. Tanque de Suministro y Válvula Aspersora.....	122
Figura 85. Capturas de las Mediciones Registradas en LabView Experimento 1.....	125
Figura 86. Capturas de las Mediciones Registradas en LabView Experimento 2.....	126
Figura 87. Capturas de las Mediciones Registradas en Lab View Experimento 3 .....	127
Figura 88. Media Móvil Utilizada para Limpieza de la Señal .....	128
Figura 89. Ajuste del Desfase en la Medición de H y $\theta$ .....	129
Figura 90. Curva H $\theta$ con y sin Corrección del Desfase .....	129
Figura 91. Curva de Retención de Agua (Dietrich, 2013, p. 66) .....	131
Figura 92. Determinación de Parámetros de van Genuchten Usando el Modulo Rosetta.....	136

Figura 93. Curvas $h(t)$ , $\theta(t)$ y $h(\theta)$ ID-05/OP-1.....	145
Figura 94. Curvas $h(t)$ , $\theta(t)$ y $h(\theta)$ ID-04/OP-2.....	145
Figura 95. Curvas $h(t)$ , $\theta(t)$ y $h(\theta)$ ID-03/OP-3.....	145
Figura 96. Curvas $h(t)$ , $\theta(t)$ y $h(\theta)$ ID-02/OP-4.....	146
Figura 97. Curvas $h(t)$ , $\theta(t)$ y $h(\theta)$ ID-01/OP-5.....	146
Figura 98. Hietograma para la Zona de Estudio Tr 10 Años. ....	176
Figura 99. Criterios Mínimos de Localización de Captaciones en una Calle (Leidy Franco, 2015, p. 104).....	177
Figura 100. Hidrograma de Entrada.....	178
Figura 101. Interpretación del Hidrograma de Salida.....	187

## LISTA DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Resultado de la Calibración de Tensiómetros .....	94
Gráfica 2. Comportamiento de la Adición de Agua a la Muestra .....	98
Gráfica 3. Curva de Deseccación de la Muestra de Suelo de Prueba .....	98
Gráfica 4. Lectura de Voltaje del Sensor de Humedad en el Suelo .....	98
Gráfica 5. Relación Entre el Voltaje y el Contenido Volumétrico de Agua .....	99
Gráfica 6. Calibración de Medidores de Contenido Volumétrico de Agua para Arena, Sensor $\theta_1$ .....	102
Gráfica 7 Calibración de Medidores de Contenido Volumétrico de Agua Para el Suelo de Plantación $\theta_2$ .....	103
Gráfica 8. Calibración del Sensor de Temperatura (LM-45) .....	107
Gráfica 9. Resultado de la Calibración de tanque para la Medición del Caudal de Salida .....	111

## RESUMEN

Con la finalidad de proponer un sistema de biorretención estándar para la ciudad de Bogotá y de aplicar la metodología de solución inversa en Hydrus-1D, se requiere determinar los parámetros  $\theta_s$ ;  $\theta_r$ ;  $\alpha$ ;  $n$  y  $k_s$  de la función de van Genuchten-Mualem sin considerar histéresis para los suelos que componen un sistema de biorretención estándar, así como las dimensiones y componentes necesarios para la implementación de dicha estructura de biorretención en la ciudad de Bogotá. La formulación de la función objetivo en Hydrus-1D parte de las mediciones de la presión capilar y del contenido volumétrico de agua en el suelo, es decir, la construcción de la curva  $h$  vs.  $\theta$ .

En primer lugar, se realizó el dimensionamiento general de la estructura de biorretención con base en la normatividad actual de paisajismo urbano y algunas recomendaciones dadas por el operador del servicio de alcantarillado de la ciudad de Bogotá. Los componentes y diseño de los suelos que se utilizaron fueron producto de la recopilación de información de diversos manuales e investigaciones previas realizadas para el dimensionamiento de sistemas de biorretención y que son aplicables para la ciudad de Bogotá.

Para poder interpretar el flujo en la zona no saturada, se realizó la construcción de un prototipo experimental del tipo columna de suelo, el cual permitió controlar y medir las variables que intervienen en la descripción unidimensional del flujo a través del sub-suelo como son: presión capilar, contenido volumétrico de agua, caudal de entrada y caudal de salida. En esta tesis se construyeron 13 instrumentos basados en sensores que miden las diferentes variables requeridas en el modelo inverso. Cabe aclarar que toda la instrumentación concebida se basó en el desarrollo de electrónica de bajo costo. La totalidad de la instrumentación se controla desde un PLC Arduino Mega y fue desarrollada como iniciativa propia del autor. Para el tratamiento de las señales y captura de datos se diseñó un programa intuitivo en la versión comercial de Lab View, software que permite crear una interfaz amigable para la visualización y control de todos los sensores en tiempo real.

Finalmente, se determinaron los parámetros hidrodinámicos  $\theta_s$ ;  $\theta_r$ ;  $\alpha$ ;  $n$  y  $k_s$  de la función de van Genuchten-Mualem, sin considerar histéresis, de los suelos de estudio mediante un modelo inverso desarrollado en Hydrus-1D y ensayos de laboratorio. También se realizaron diversos modelos directos para determinar el tiempo de retención y el flujo de salida para la condición de operación de la estructura de biorretención. Con los resultados de este modelo se propuso una capa que sirve de almacenamiento en el fondo de la estructura, que se compone de rocas que permiten establecer un adecuado volumen de retención. También se realizó un modelo directo en Hydrus-1D como ejemplo de aplicación para una zona urbana de Bogotá, con el fin de observar el comportamiento de la estructura y el porcentaje de mitigación del pico de escorrentía superficial en condiciones normales de funcionamiento, utilizando datos hidrológicos propios de la zona de estudio suministrados por el operador del servicio de acueducto y alcantarillado de la ciudad de Bogotá.

### **Palabras clave:**

Calibración Hidrodinámica de suelos, Columna de Suelo, Flujo en la zona no saturada, sistemas de Biorretención, Infiltración, Drenaje sostenible, Instrumentación en suelos, Aplicación Hydrus-1D., Solución Inversa.

## ABSTRACT

In the intent to propose a standard bioretention system in Bogota city and in order to apply the inverse solution methodology on Hydrus – 1D, it is mandatory to determine each  $\theta_s$ ;  $\theta_r$ ;  $\alpha$ ;  $n$  and  $k_s$  parameters in van Genuchten – Mualem function, without considering the hysteresis phenomenon, for standard bioretention system composing soils, as well as required components and dimensions to implement the bioretention structure in Bogota. The objective function formulation on Hydrus – 1D comes out from measurements of capillary pressure and soil water saturation, namely, setting up the soil water retention curve (h vs.  $\theta$ ).

First, a bioretention structure general dimensioning was carried out based on current urban landscaping regulations and recommendations given by the sewage - system service provider in Bogota city. Soil composing and design were performed after information gathering and previous investigation on bioretention systems dimensioning that are convenient to apply in Bogota city.

To give an adequate interpretation of the vadose zone, a soil column experimental prototype was built to be able to control and measure the intervening parameters in the subsoil unidimensional flow description, such as capillary pressure, soil water saturation, inflow and outflow. While developing this project, thirteen sensor - based devices were built to measure the inverse model required parameters. It is important to underline that all the designed instrumentation was based on low cost electronic development. In addition, the whole instrumentation system is controlled by an Arduino Mega PLC and was designed and built as a personal initiative by the author of this work. For signal processing and data capturing, a commercial Lab View version intuitive program was designed, to be able to create a user-friendly interface to make real-time sensor visualisation and control.

Finally, all the hydrodynamic van Genuchten – Mualem function parameters ( $\theta_s$ ;  $\theta_r$ ;  $\alpha$ ;  $n$  and  $k_s$ ), without any hysteresis phenomenon considerations, were determined for the soils under study by using a Hydrus-1D inverse model and laboratory results. In addition, several direct models were run in order to determine both bioretention structures' operation condition retention time and outflow. A storage layer in the base of the structure, which is made up by rocks to settle an appropriate retention volume, was suggested after computing model results. A Hydrus-1D direct model was also made as an application example for an urban zone in Bogota in order to observe the structure's behaviour and the runoff - peak mitigation percentage under normal functioning conditions, using hydrological data from the study region given by the water and sewage - service provider in Bogota city.

### **Keywords:**

Bioretention, Hydrodynamic Soil Characterization, Soil Column, Vadose Zone Flow, Soil Water Retention Curve, Infiltration, Sustainable Drainage, Soil Instrumentation, Hydrus-1D Application, Inverse Solution.



## INTRODUCCIÓN

La presente investigación tiene como principal propósito encontrar, a partir del modelo inverso que ofrece Hydrus 1D para el ajuste de parámetros, las propiedades hidrodinámicas de los suelos que componen un sistema de biorretención con base en la medición experimental de las curvas  $H$  vs  $\theta$  sobre un montaje de columna de suelo. Con el propósito de brindar al investigador una herramienta accesible para la planeación y control de un ensayo de columna de suelo, la instrumentación necesaria para la lectura de las variables que intervienen en el proceso del flujo en la zona vadosa se desarrolla a partir de electrónica de bajo costo. Para la interpretación y visualización de los datos en tiempo real se diseña una interfaz gráfica en el software Lab View, altamente usado en sistemas de control y automatización.

En pro del cumplimiento de los objetivos planteados en la tesis, en el primer capítulo se propone el dimensionamiento de una estructura de biorretención con base a las recomendaciones generales dadas por los manuales de diseño internacionales y teniendo en cuenta la distribución del paisajismo en la ciudad de Bogotá, además de algunas normas aplicables. Esta propuesta tiene como objeto atender la necesidad de mejora de las infraestructuras urbanas actuales, con el fin de iniciar un proceso de transformación de las estructuras tradicionales en sistemas de drenaje urbano sostenible, que se ha demostrado es el primer paso para la conceptualización de estos sistemas dentro del contexto del paisajismo y drenaje urbano tradicional.

Los componentes del sistema de biorretención propuesto se seleccionan o dimensionan de acuerdo a las necesidades propias de la región de estudio y se limita el alcance de la investigación al estudio de los procesos que intervienen en el flujo de agua a través de los diferentes componentes de suelo sin incluir la vegetación sobre la estructura. El resultado de este análisis se resume en un esquema guía que servirá para la proyección y construcción de la estructura de biorretención propuesta.

Puntualmente, la interpretación del flujo en zona no saturada requiere de un desarrollo experimental importante, pues el proceso de calibración hidrodinámica es de gran complejidad y depende principalmente de la calidad de los datos registrados, así como de las características físicas propias de cada suelo, entre las más importantes: granulometría, densidades, porosidad y el proceso de mezclado de suelos. De este modo, en el capítulo 4 se detalla el proceso de instrumentación, concepción y automatización del ensayo de columna de suelo.

Se propone entonces utilizar una serie de ensayos de columna de suelo, ensayos de laboratorio, y la modelación numérica en Hydrus 1D como una herramienta conjunta en el diseño de un sistema de biorretención, centrando el interés particular en el volumen de almacenamiento. Para lograrlo, se establecen las principales características del flujo en la zona vadosa, sus propiedades y las diferentes condiciones de frontera que pueden aplicarse al sistema de biorretención propuesto.

Definidos todos los procesos experimentales, la recuperación y análisis de los datos se convierte en un factor valioso para la toma de decisiones, la selección del muestreo es fundamental para la construcción y análisis del modelo inverso y directo con Hydrus-1D; utilizando este motor de cálculo como herramienta, se propone una alternativa para el dimensionamiento de la capa de almacenamiento en la estructura, así como su aplicación y análisis de funcionamiento ante un evento de lluvia típico para una zona de estudio de la ciudad de Bogotá.

## OBJETIVOS

### Objetivo General:

Utilizando la modelación inversa de Hydrus 1D, determinar las propiedades hidrodinámicas de las capas de suelo en una estructura de biorretención, sin vegetación, para establecer el espesor adecuado de la capa de almacenamiento y su aplicación para un evento de lluvia típico de la zona urbana de la ciudad de Bogotá.

### Objetivos Específicos:

-Referenciar las metodologías de diseño actuales que pueden ser aplicadas al dimensionamiento de sistemas de Biorretención en el sistema de aguas lluvias.

-Identificar los componentes de una estructura de Biorretención aplicado a la ciudad de Bogotá.

-De las metodologías generales seleccionar las dimensiones y/o requerimientos de los suelos, agregados y membranas de la estructura de Biorretención propuesta.

-Determinar, con el estudio de un piloto experimental y la modelación inversa del software Hydrus 1D, las características hidrodinámicas de la estructura de Biorretención sin vegetación.

-Con el modelo directo en Hydrus 1D, determinar el espesor adecuado de la capa de almacenamiento.

-Mediante un Modelo Directo en Hydrus 1D, verificar el comportamiento de la estructura propuesta con datos hidrológicos de la zona de estudio.

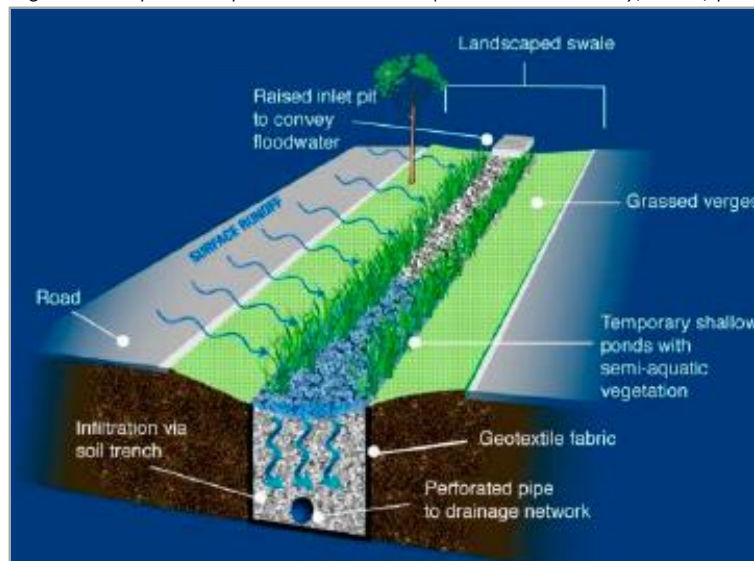
## 1. SISTEMAS DE BIORRETENCIÓN

Las estructuras sostenibles nacen como una alternativa a la solución del problema de drenaje urbano en las ciudades del mundo. Las estructuras denominadas *Best Management Practices* (BMP), Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS), *Water Sensitive Urban Design* (WSUD), y *Low Impact Development* (LID) forman parte de una nueva visión en el diseño hidráulico de urbanismo. Una de las estructuras más conocidas son los sistemas de biorretención, que están directamente relacionados con las características del suelo nativo, la hidrología urbana, procesos de infiltración y evapotranspiración etc. En los siguientes subcapítulos se establecen las definiciones y elementos que componen estos sistemas.

### 1.1. DEFINICIÓN

Una superficie de biorretención consiste en un área vegetada, con plantas de mediana altura, que se disponen ordenadamente en una depresión de suelo poco profunda; generalmente esta área permite la acumulación de cierto volumen de agua. Las estructuras de biorretención tienen como base los procesos de infiltración, fitorremediación y evapotranspiración (CIRIA, 2007, pp. 11–1).

Figura 1. Esquema Típico Biorretención (Monash University, 2009, p. 7)



Estos sistemas pueden ser comparados con un humedal natural o artificial, donde se mantiene, a través de procesos químicos, biológicos, y propiedades físicas, de suelos y plantas, un equilibrio entre la cantidad, la calidad y el control de la escorrentía superficial. La disposición de las capas de suelos y los volúmenes previstos para el almacenamiento temporal facilitan los procesos de adsorción, infiltración, intercambio iónico, descomposición, fitorremediación, biodegradación y amortiguación de picos de escorrentía superficial locales (Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland, 2007; EPA, 2004a).

Un sistema de biorretención está definido como una estructura con un diseño simplificado que se adecua en el sitio de captación con el fin de favorecer la infiltración de la escorrentía, el almacenamiento y la adsorción del agua por la vegetación y la evapotranspiración. Los sistemas de biorretención son estructuralmente una serie de capas de diversos materiales que establecen el medio adecuado para capturar y retener el agua lluvia. Cuando es colmado el volumen de poros de los materiales, la escorrentía superficial se retiene en el lecho orgánico que sirve como medio para el crecimiento de la vegetación. El agua acumulada, y el gradiente

hidráulico generado, permite que el volumen almacenado se infiltre en el subsuelo (Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland, 2007; EPA, 2004b).

Existen varios tipos de sistemas de biorretención empleados en la actualidad, que reciben su nombre dependiendo de la localización y el uso para el cual se dimensionan, entre ellos: bioswale (canales vegetados), rain garden (jardines de lluvia), zanjas de infiltración, estructuras permeables como pavimentos y concretos porosos, entre otros. (CIRIA, 2007; Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland, 2007).

En la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos EPA por sus siglas en inglés, (EPA, 1999, 2004a, 2004b, 2004c) se usa la clasificación dada por *The American Society of Civil Engineers* (ASCE), en la cual se clasifican los sistemas de biorretención de acuerdo a la función de tratamiento que tiene cada una y los cataloga, dentro del marco de los procesos BMP en dos grandes grupos: Sistemas estructurales y sistemas no estructurales. Los métodos estructurales son aquellos que se usan para el tratamiento del agua lluvia en el punto de recolección o en el vertimiento (García Haba, 2011, p. 55), entre los que se encuentran:

- Sistemas de infiltración: Depósitos de infiltración, zanjas y pozos de infiltración, estructuras permeables.
- Sistemas de detención: depósitos de detención, sistemas subterráneos.
- Sistemas de retención: estanques de retención, tanques y tuberías de retención.
- Humedales artificiales: humedales construidos por el hombre que pueden tener canales y sistemas combinados.
- Sistemas de filtrado: filtros superficiales, subterráneos, construidos en materiales granulares.
- Biofiltros: Franjas filtrantes con césped, cunetas verdes, terrazas verdes.

Dichas estructuras están diseñadas principalmente para mantener y conservar la calidad del agua. Por otra parte, las prácticas no estructurales cumplen el objetivo de prevenir la contaminación, crear conciencia ambiental en la sociedad, gestionar el manejo de los sistemas de drenaje y la preservación del agua. Están diseñadas para capturar y retener las aguas lluvias en un punto evitando así que se contamine en la ruta de recolección. (EPA, 1999).

En el Reino Unido la clasificación propuesta por *The Scottish Environment Protection Agency* (SEPA) y por *The Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA), clasifican a los sistemas SUDS dependiendo del nivel de tratamiento que se logre efectivamente en la estructura o proceso, los dividen principalmente en tres grandes grupos (CIRIA, 2007; Scottish Environment Protection Agency (SEPA), 2002):

- Técnicas de tratamiento en el origen: Depósitos de infiltración, pavimentos porosos, zanjas de retención.
- Técnicas de tratamiento en la conducción: drenes filtrantes o filtro francés, cunetas verdes.
- Técnicas pasivas de tratamiento: Humedales artificiales, Estanques y depósitos de retención.

### 1.1.1. Sistemas de infiltración y retención

En los sistemas de infiltración el proceso de filtración tiene un impacto directo en la calidad del agua, porque el suelo es el medio encargado de la eliminación de los contaminantes, sin embargo, no es recomendable usarlos en zonas donde las líneas de infiltración alcancen el nivel freático. La contaminación del agua subterránea se hace evidente porque la escorrentía superficial puede contener aguas con contaminantes provenientes de las calles, de los hogares, zonas industriales etc. (EPA, 1999).

Un pozo de infiltración (*dry wells o soakaways*) funciona como una estructura amortiguadora del pico de escorrentía valiéndose del almacenamiento subterráneo y la infiltración para un aumento en el tiempo de retención y en el volumen de agua disipado. Los pozos de infiltración pueden ser empleados para recoger pequeñas escorrentías, cómo bajantes de aguas lluvias de viviendas unifamiliares, en drenaje urbano pueden ser usados en combinación con estructuras convencionales de captación, que generalmente se pueden fundir in situ o añadirse a módulos prefabricados (Anta Álvarez, Puertas Agudo, Suárez López, D. Rio Cambeses, & Hernandez Oubiña, 2008, p. 385; Maritz, 1990).

Figura 2. Pozo de Infiltración (García Haba, 2011, p. 63)



Los estanques de retención son estructuras cuyo objetivo principal es transformar la escorrentía superficial en agua subterránea, cumplen estrictamente la función de remoción de contaminantes, como residuos de hidrocarburos, basuras, metales pesados en poca cantidad, etc. Este proceso se produce por sedimentación y por procesos de fitorremediación. Estas estructuras tienen un vertimiento controlado, de modo que la mayoría del caudal retenido se almacena durante un periodo prolongado, favoreciendo la infiltración y la evapotranspiración (Anta Álvarez et al., 2008; EPA, 1999).

Figura 3. Estaque de retención



Fuente: <http://drenajurbanosostenible.org/wp-content/gallery/estanques-retencion/c-15 - retention and detention - retention ponds.jpg>

#### 1.1.2. Jardines de lluvia

Conocidos generalmente como *Rain Garden* (Figura 4), los sistemas de biorretención pueden almacenar cantidades considerables de agua, llegando a acumular láminas de agua hasta de 20 mm por un tiempo que va desde las 12 horas hasta 1.5 días, facilitando la evaporación e infiltración (Jones & Hunt, 2011, p.25). Los jardines de lluvia, que son pequeñas excavaciones con plantas nativas y vegetación, actúan como retenedores de escorrentía, que puede provenir de tejados, calles, drenes etc. Son muy similares a los estagues de detención y *bioswales*, ya que permiten el desarrollo de procesos de infiltración y evapotranspiración sin transporte, es decir, son volúmenes que se estancan y se redistribuyen en una misma zona. También son capaces de contribuir en la mitigación del pico de escorrentía superficial de aguas lluvias. (MARC & APWA, 2003, p. 102)

Figura 4. Rain Garden (EPA, 2004b)



#### 1.1.3. Canales Vegetados

Los canales vegetados (*Biofiltration Swales*) Figura 5, que generalmente tienen sección trapezoidal, están compuestos por extensas áreas poco profundas, que contienen una densa vegetación, en la cual se recoge la escorrentía superficial, de modo que la mayoría de los contaminantes son tratados por la acción de la infiltración a través de la vegetación y el suelo. Generalmente se contempla un sub drenaje y un vertedero de excesos en su dimensionamiento. Son estructuras que permiten el transporte de grandes volúmenes de agua, su capacidad de remoción es función de las dimensiones geométricas de la estructura, pendiente longitudinal,

tiempo de retención y el tipo de vegetación que lo compone. Son efectivos para atrapar basuras, sólidos suspendidos totales y metales particulados (California Department of Transportation, 2012, p. 2; MARC & APWA, 2003, p. 186).

*Figura 5. Bioswale Usado en Drenaje Rural*



Fuente: <http://www.dot.ca.gov/hq/LandArch/ec/stormwater/images/bioswale.jpg>

#### 1.1.4. Pavimentos Permeables

Los pavimentos permeables son estructuras de biorretención que tienen como objetivo la retención e infiltración de escorrentía superficial en el origen del sistema, que se han implementado desde los años 70 en gran parte de los Estados Unidos. Estas estructuras pueden ser utilizadas en parqueaderos, vías primarias y secundarias, y en general, en cualquier estructura que requiera de una superficie de rodadura. Los materiales en los que se pueden construir son diversos, entre ellos se pueden mencionar: concreto poroso, mampostería, celdas de césped con refuerzo plástico, concreto asfáltico poroso etc. (García Haba, 2011). Están compuestos por una serie de capas permeables que actúan como retenedores, y en conjunto soportan las cargas del tráfico, conceptualmente (García Haba, 2011, p. 74) los define como se muestra en la Figura 7.

*Figura 6. Pavimento Permeable (García Haba, 2011, p. 91)*

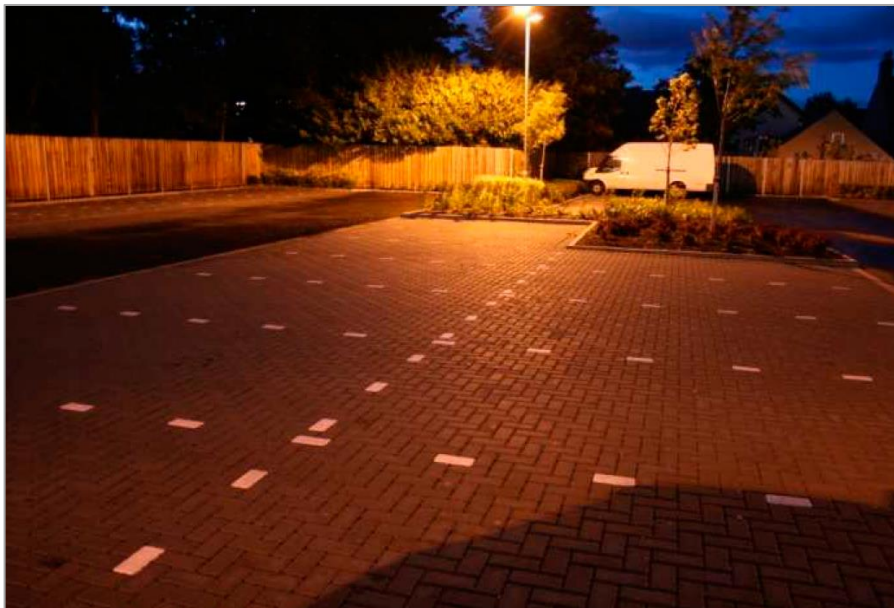
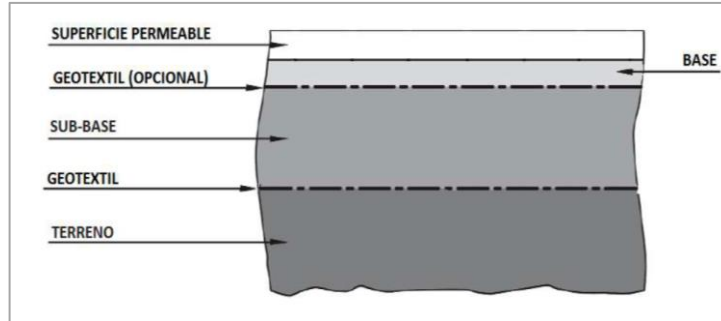


Figura 7. Sección Típica de Pavimentos Permeables (García Haba, 2011, p. 74)

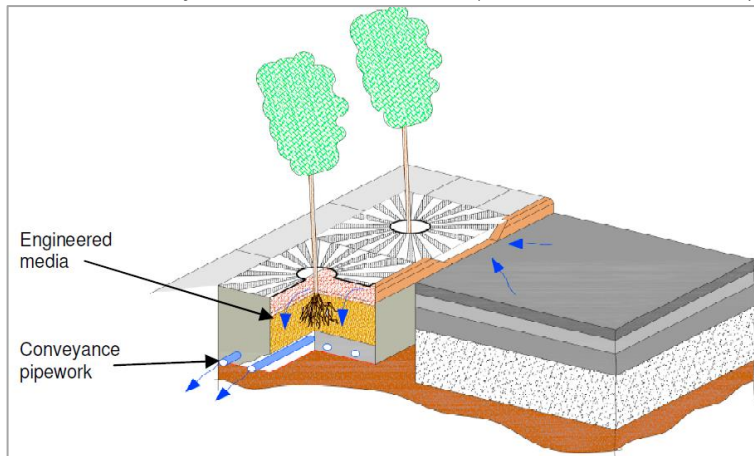


#### 1.1.5. Sistemas Prefabricados

Existe un grupo de sistemas de biorretención prefabricados que están diseñados principalmente para ser ubicados sin la necesidad de realizar procesos constructivos extensos. Estos han adquirido un importante uso en vías y en zonas multimodales por su fácil instalación y mantenimiento mínimo. Un sistema prefabricado está basado en la clasificación de los sistemas BMP, mantiene los mismos componentes, propósitos y materiales de un sistema de biorretención común, pero son compactos y se pueden incorporar fácilmente en los sistemas tradicionales de drenaje urbano.

Los sistemas prefabricados típicamente están compuestos por una membrana, puede ser de concreto u otro material, permeable o no, que encierra toda la estructura. Estos límites contienen el medio permeable compuesto por diversas capas de materiales en cuya superficie tiene lugar la vegetación y el área de almacenamiento prevista (Allerton & Pittner, 2010). Dichos sistemas pueden tener o no etapas de pre-tratamiento, tratamiento y amortiguación de picos de lluvia.

Figura 8. Sistema Prefabricado de Biorretención (Allerton & Pittner, 2010, p. 63)



#### 1.1.6. Ventajas

De acuerdo con *The Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA), algunas ventajas de estos sistemas son (CIRIA, 2007):

- Pueden ser planeados dentro del paisajismo urbano



- Son muy efectivos para la remoción de contaminantes urbanos, incluyendo metales pesados.
- Pueden reducir el volumen y la tasa de escorrentía superficial.
- Diseño flexible que se adapta fácilmente al entorno.
- Siempre que el sistema esté bien planeado y se disponga de un espacio adecuado, funciona adecuadamente en áreas muy impermeables.
- Tienen buena capacidad de adaptación.

De acuerdo con el Departamento de Recursos Ambientales del Condado de Maryland, otras ventajas de estos sistemas son (Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland, 2007):

- Pueden ser utilizados para imitar las condiciones hidrológicas existentes en una zona mediante el tratamiento de los volúmenes directamente asociados con la escorrentía superficial.
- Establecen un medio natural único para las plantas y suelos nativos de la zona.
- Ayuda al desarrollo de la gestión ambiental y alienta el sentido ambiental de la comunidad.
- Provee gran variedad de beneficios ambientales, como son: hábitat adecuado para la fauna y flora nativa, mejora la calidad del aire, reduce el uso de energía y ayuda a controlar el micro clima urbano.
- Aumenta el valor de las propiedades por su belleza paisajística.

#### 1.1.7. Desventajas

De acuerdo con *The Construction Industry Research and Information Association* (CIRIA), algunas ventajas de estos sistemas son (CIRIA, 2007):

- Requieren mantenimiento adecuado y área superficial.
- Susceptibles a la colmatación si no existe mantenimiento adecuado.
- No es recomendable en zonas con pendientes altas.

De acuerdo con el Departamento de Recursos Ambientales del Condado de Maryland, otras ventajas de estos sistemas son (Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland, 2007):

- Es necesario un mantenimiento regular constante.
- En algunos casos pueden ser costosos en comparación con las estructuras convencionales.
- Aunque son eficaces, no son óptimos en suelos poco permeables.

#### 1.1.8. Aplicación

Los sistemas de biorretención pueden ser incluidos dentro del urbanismo para controlar y tratar los volúmenes de escorrentía y al mismo tiempo para mejorar la calidad el agua. Toda zona blanda dentro del paisaje urbano de una ciudad representa una oportunidad para instalar un sistema de biorretención.

En los nuevos desarrollos urbanísticos pueden ser usados en las zonas privadas, así como en las áreas comunes y, es posible combinarlos con jardines y zonas verdes, lo que resulta en una jardinería multifuncional y con un valor visual agregado.

Del mismo modo, las áreas comerciales e industriales son apropiadas para implementar sistemas de drenaje urbano sostenible, incorporados en las bahías de estacionamiento, áreas verdes perimetrales, entradas peatonales, en separadores e incluso en los techos. El uso de estructuras biorretenedoras da un valor ambiental a cualquier proyecto industrial, lo que permite, entre otras cosas, la armonía con el medio natural y el entorno social.

Unas de las aplicaciones más sobresalientes consisten en la adaptación de estos sistemas en las vías vehiculares y peatonales en el drenaje urbano, ya que las vías se constituyen como estructuras de gran importancia. La

localización estratégica de estructuras de biorretención en vías ofrece la posibilidad de capturar y retener la escorrentía superficial mitigando los hidrogramas que llegan a los puntos de recolección del alcantarillado tradicional, también proporcionan un embellecimiento paisajístico en el sendero vial. La vegetación es a su vez el medio por el cual se mejora la calidad del agua, que finalmente mejora la economía en el tratamiento.

## 1.2. TÉCNICAS DE DIMENSIONAMIENTO

Algunos de los elementos que influyen en el dimensionamiento de un sistema de biorretención, de acuerdo con las diferentes guías que existen en la actualidad y que tratan el tema de su funcionamiento y condiciones de diseño son:

- Limitaciones y condiciones in situ
- Usos del suelo
- Tipo de suelo natural
- Contaminantes en el agua captada
- Caracterización hidrodinámica del suelo
- Funcionamiento del sistema de drenaje
- Recarga de acuíferos
- Inundaciones

### 1.2.1. Criterios de dimensionamiento manual CIRIA (CIRIA, 2007)

Un sistema de biorretención debe tener el área suficiente para poder almacenar el volumen captado, teniendo en cuenta que no se debe dejar una lámina de agua en almacenamiento mayor a 0.15 m. la estructura debe, en lo posible, drenar todo el volumen retenido en menos de 24 horas, con el fin de responder ante eventos de lluvia próximos.

*Tabla 1. Componentes del sistema de Biorretención (CIRIA, 2007)*

COMPONENTE	PROPÓSITO
Cobertura vegetal	Para reducir la velocidad del flujo entrante y controlar el transporte de material particulado.
Área de almacenamiento	Para el almacenamiento superficial, temporal, del agua antes de la evaporación, infiltración y consumo de las plantas. Favorece también la decantación y amortiguación de crecientes.
Área orgánica	Para la filtración, y mantener las condiciones biológicas necesarias para degradación de hidrocarburos y materia orgánica.
Suelo de siembra	Para mantener la vegetación en el sistema, suelos con contenidos de arcillas son ideales para mejorar la adsorción en el sitio de hidrocarburos, metales pesados y nutrientes.
Vegetación	Para proporcionar la absorción de contaminantes.
Lecho de arena	Para mejorar las condiciones de drenaje y condiciones aérobicas del suelo de siembra.
Árboles grandes y vegetación alta	Para interceptar la precipitación y favorecer la evaporación del agua, disipar la energía de la lluvia y la escorrentía, facilitan la infiltración y la recarga de acuíferos, producen sombra y reducen la temperatura de la escorrentía.

Figura 9. Sección típica biorretención (CIRIA, 2007)

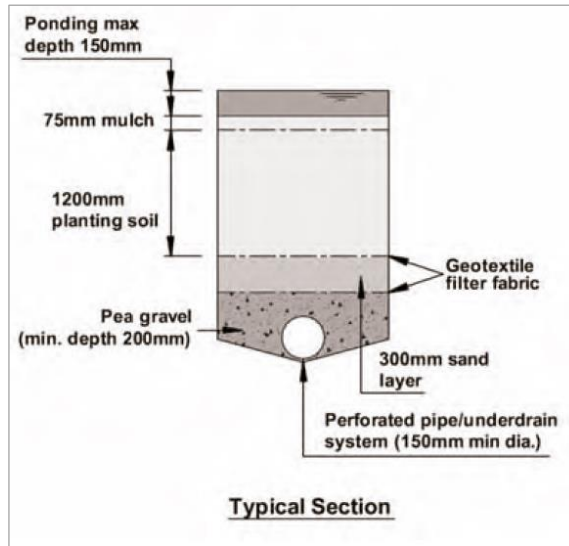


Tabla 2. Consideraciones generales del uso de áreas de Biorretención.

Área de drenaje	Las áreas de biorretención son generalmente aplicadas a pequeñas cuencas, aunque para áreas grandes se debe dividir en zonas más pequeñas que pueden estar o no interconectadas.
Espacio requerido	Típicamente las áreas de biorretención ocupan desde un 5% hasta un 10% del área de drenaje. Es posible integrarlas en el paisajismo urbano.
Localización	Las áreas de biorretención deben ser integradas dentro del planteamiento urbanístico y paisajístico de la zona. Estos sistemas están diseñados para flujos intermitentes y deben ser diseñadas para drenar y re-airear entre eventos de lluvia. No deben ser usadas en flujos continuos de aguas subterráneas, en descarga de sistemas de bombeo u otras fuentes.
Estabilidad y pendiente del sitio	<p>Pueden ser usadas en la mayoría de terrenos, sin embargo, resulta difícil incorporarlas en cuencas con altas pendientes.</p> <p>Los sistemas de biorretención sin impermeabilización no deben utilizarse donde la infiltración genere inestabilidad en el terreno, en la cara superior o cortes de taludes, cerca de fundaciones o en zonas de deslizamientos. La decisión de su uso debe ser evaluada por un ingeniero geotécnico o geólogo. Los efectos del almacenamiento de agua sobre la capacidad portante del terreno deben evaluarse cuidadosamente, así como, los taludes y sistemas de contención usados para manejar los riesgos asociados con el almacenamiento de agua.</p>

Subsuelo y Aguas Subterráneas	<p>Cuando las áreas de biorretención son diseñadas con infiltración el nivel freático debe estar a más de 1 m por debajo de la base, con el fin de proteger las aguas subterráneas. Generalmente las estructuras de biorretención requieren una tasa mínima de infiltración de 1.5 cm/h para un funcionamiento adecuado. Las áreas de biorretención no deben ser utilizadas en zonas industriales abandonadas, a menos que se estimen los efectos de los contaminantes en la zona. No deben utilizarse estructuras totalmente permeables en puntos donde haya riesgo de contaminación de agua subterránea.</p>
----------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

#### 1.2.1.1. Área superficial

El Área de biorretención debe ser dimensionada para proveer la superficie suficiente para el almacenamiento temporal del volumen de tratamiento. El almacenamiento se mantiene como una capa de no más de 0.15 m de profundidad en la superficie. Esto mejora el proceso de evaporación y debe limitar la cantidad de tiempo que el agua permanece en la superficie. Bajo condiciones normales, el tiempo que el agua permanece en la superficie debe limitarse ya que es un factor decisivo en la elección de las plantas. Es recomendable que la estructura de biorretención drene dentro de las 48 horas siguientes a la tormenta de diseño, y debe, por lo menos, en las siguientes 24 horas tener una capacidad del 50%. El área requerida se puede calcular usando la siguiente expresión (1):

$$A_s = \frac{V_t L}{k(h + L)t} \quad (1)$$

Dónde:

$A_s$ : Área superficial del lecho filtrante ( $m^2$ )

$V_t$ : Volumen de tratamiento de calidad de agua ( $m^3$ )

$L$ : Profundidad del lecho filtrante ( $m$ )

$k$ : Coeficiente de permeabilidad del medio filtrante para el agua ( $m/s$ ), para los lechos de siembra del suelo,  $k = 0.000002 m/s$  (valor promedio para suelo franco-limoso).

$h$ : Altura promedio del agua sobre el lecho filtrante ( $m$ )

$t$ : Tiempo requerido para que el volumen de agua se filtre a través del suelo ( $seg$ ).

Como comprobación de diseño se puede utilizar 5% del área de drenaje multiplicada por el coeficiente de escurrimiento (método racional) cuando la estructura tiene lecho de arena y el 7% multiplicada por el coeficiente de escurrimiento si no se tiene lecho de arena.

#### 1.2.1.2. Geometría

La geometría de las áreas de biorretención depende fundamentalmente del entorno donde se instalen, de las características propias del lugar y los criterios particulares de diseño, sin embargo, se pueden seguir los siguientes criterios para un óptimo funcionamiento en la remoción de contaminantes, y buenas prácticas de mantenimiento:

La forma no es un factor crítico en el dimensionamiento, puede utilizarse un ancho mínimo de 3 metros y una longitud en relación con el ancho de 2:1, permiten la siembra aleatoria de pequeños árboles y arbustos leñosos, plantas que pueden retener contaminantes y facilitan la operación y mantenimiento del sistema.

El lecho de suelo orgánico debe tener una profundidad mínima de 1 m, cuando se planten árboles la profundidad debe estar comprendida entre 1.2 a 1.5 m.

### 1.2.1.3. Materiales

Es recomendable extender una capa de abono orgánico, con un espesor máximo de 75 mm, en toda la superficie del sistema. No se deben usar restos de corte de vegetación como abono; pueden aumentar el nivel de nutrientes en el agua. Puede usarse una capa de gravilla superficial para la protección del lecho.

El suelo utilizado debe ser lo suficientemente permeable para permitir que el agua pase a través de él, y evitar que se inunde la superficie de biorretención. La capa de suelo debe ser franco arenoso o arena arcillosa con las siguientes proporciones:

*Tabla 3. Porcentaje de suelos capa de cobertura*

Componente	Proporción en el suelo
arena	35-60%
Limo	30-50%
Arcilla	10-25%
Materia orgánica	0-4%
Capa superficial	---

De acuerdo a la Norma Británica BS 38882, este suelo de cobertura debe tener una permeabilidad mínima de  $3.5 \times 10^{-6}$  m/s (12.6 mm/h).

Esta capa de suelo debe estar libre de rocas, raíces o cualquier otro objeto mayor a 50 mm de diámetro medio y debe estar libre de maleza. El filtro de arena debe tener un mínimo de 0.30 m de espesor y estar compuesto de arena con un tamaño de grano que va desde 0.5 mm hasta 1 mm. La grava alrededor de sub-drenaje debe tener un tamaño de grano desde 20 mm hasta 5 mm de acuerdo con la norma británica BS 882 (BSI, 1992) o similar.

### 1.2.2. Criterios de dimensionamiento EPA (EPA, 2004b)

Un sistema de biorretención incorpora los siguientes componentes:

- Control del flujo de entrada
- Pre-tratamiento
- Área de inundación superficial
- Capa orgánica superficial.
- Capa para el sustento de la vegetación.
- Material vegetal.
- Lecho de arena.
- Sistema de sub-drenaje compuesto por gravas o suelos permeables.
- Sistema para el control del desbordamiento.

Cada uno de los componentes del sistema de biorretención es esencial para el adecuado funcionamiento a largo plazo del sistema, debe ser evaluado cuidadosamente en la etapa de dimensionamiento.

#### *Control del flujo en la entrada:*

La estructura de entrada es importante para el funcionamiento del sistema de biorretención, se deben asegurar velocidades no erosivas y la protección adecuada contra la obstrucción por elementos de gran tamaño. Si se

considera un canal de entrada, la lámina de agua en este, debe estar comprendida entre 6 y 9 cm. Este elemento es indispensable para garantizar el volumen adecuado en el sistema de biorretención.

*Pre-tratamiento:*

Este componente es opcional, pero es altamente recomendado cuando se tiene suficiente espacio. El pre-tratamiento reduce las velocidades entrantes y retiene los sedimentos, lo que hace más extensa la vida útil del sistema de biorretención.

*Área de inundación superficial:*

Es un área de inundación por encima de la capa orgánica y la zona de las raíces de la vegetación, su función principal es el almacenamiento del volumen de diseño. Esta área también permite el asentamiento de partículas y sedimentos sobre la capa orgánica.

*Capa orgánica superficial:*

Esta capa proporciona las condiciones adecuadas para el crecimiento de la vegetación, mantiene la humedad y permite la descomposición de la materia orgánica. Actúa como un filtro para las partículas más finas que permanecen en suspensión. Mantiene también, un entorno adecuado para la población bacteriana que interviene en la degradación de los contaminantes provenientes de la escorrentía superficial urbana.

*Capa para el sustento de la vegetación:*

Esta capa proporciona una región para que los nutrientes y el agua puedan llegar fácilmente a la capa superior y sustente la vegetación en el sistema. Los vacíos en los poros de esta capa ofrecen un volumen adicional de almacenamiento de escorrentía. También ayuda en la remoción y adsorción de moléculas a través del intercambio de cationes.

*Material Vegetal:*

La vegetación es fundamental para extraer nutrientes y algunos contaminantes por medio de la fitorremediación, también favorecen el proceso de evaporación y transpiración. El uso de plantas navitas, combinadas con un área mínima de siembra, proporciona cobertura para la fauna y crea un nicho ecológico dentro del paisaje urbanístico.

*Lecho de arena:*

Esta capa es opcional, pero es recomendada para mantener las partículas de suelo más finas y evitar que se transporten en el sistema de drenaje a través del sub-drenaje. Se recomienda un espesor nominal de 0.4 m.

*Sistema de sub-drenaje:*

Compuesto por gravas o suelos permeables, este componente es utilizado para recolectar y redistribuir el volumen de agua captado. Un buen sistema de sub-drenaje ayuda a mantener el flujo en las capas inferiores. Esta capa se compone de grava con un diámetro medio que va desde 4 pulgadas hasta 6 pulgadas. Este sistema puede estar conectado o no al sistema de drenaje del subsuelo.

*Sistema para el control del desbordamiento:*

Este componente está diseñado para desaguar la estructura en eventos que superen la capacidad de almacenamiento. Puede dimensionarse como un vertedero tradicional, canal de rebose u otro sistema para regulación del nivel.

### 1.2.3. Sistema de Biorretención en Vías

La estructura de captación puede disponerse lateralmente como una ventana en un sumidero tradicional, debe combinarse con una caída de 6 pulgadas por debajo de la acera con un diafragma de gravilla, la energía del

agua debe disiparse por medio de una capa de gravas. Cuando las pendientes son muy altas se puede utilizar canales deflectores para disipar la energía a la entrada de la estructura.

Figura 10. Esquema típico en planta Biorretención (EPA, 2004b, pp. 7-7)

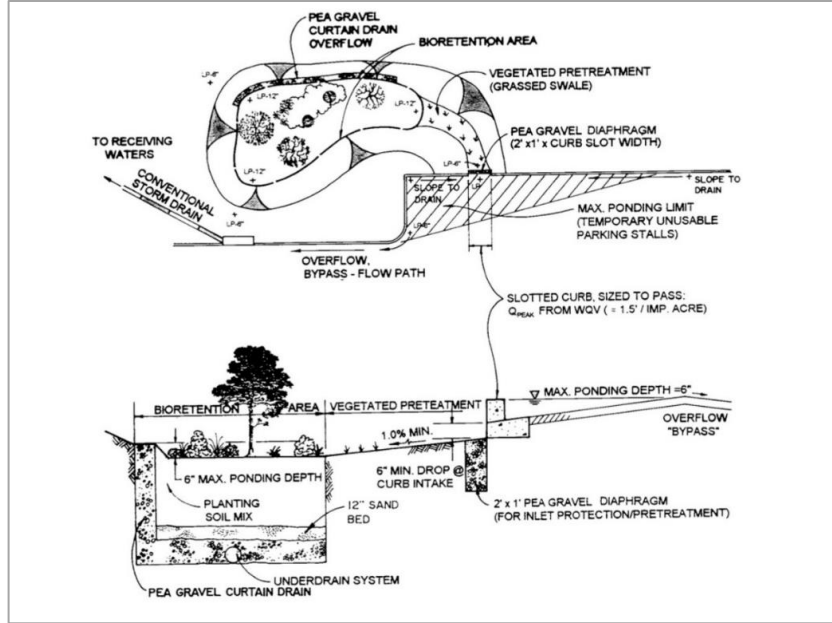
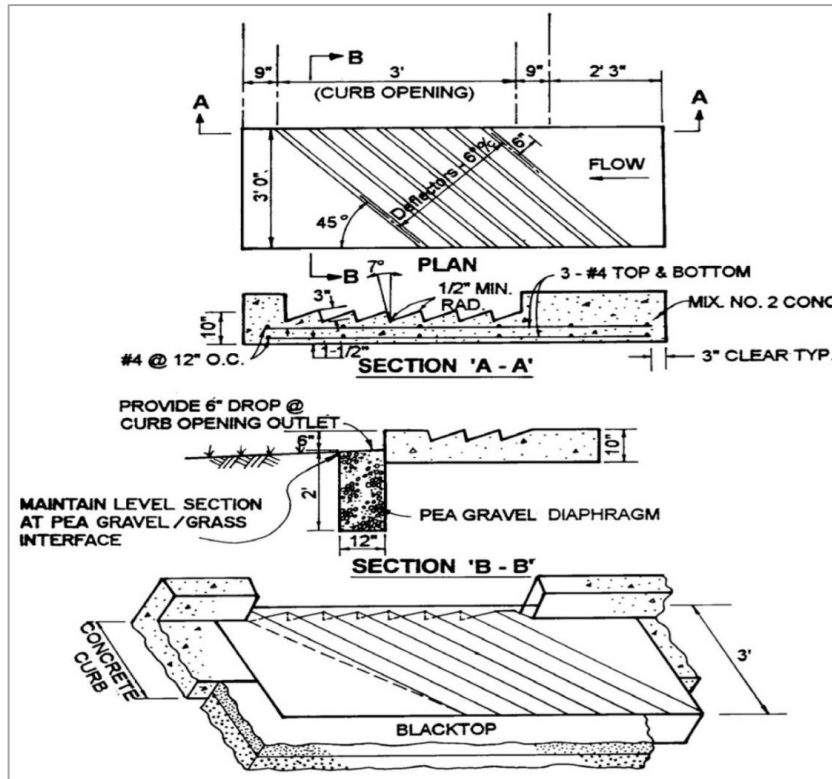


Figura 11. Esquema Típico de Captación Biorretención (EPA, 2004b, pp. 7-8)



### 1.2.3.1. Área superficial de almacenamiento:

El sistema de biorretención debe dimensionarse para un volumen de agua determinado, ya sea para la infiltración o para la capa de almacenamiento.

Con el fin de mantener un nicho adecuado, y para ayudar a simular las condiciones que existen dentro de un ecosistema forestal, se recomienda que las áreas biorretenedoras tengan un área superficial mínima. Algunas de las recomendaciones para cumplir con este principio son las siguientes:

Tabla 4. Dimensiones recomendadas para sistemas de Biorretención (EPA, 1999)

Dimensión	Rango recomendado (m)
Ancho mínimo	1.80 - 3.0
Longitud mínima	3.0 - 4.5
Altura máxima de encharcamiento	0.15 - 0.30
Capa mínima suelo de plantación	0.60 - 1.20
Lecho de arena	0.3

El ancho mínimo permite la separación aleatoria de árboles y arbustos, también permite densidades de vegetación capaces de crear un ambiente apropiado donde es posible reducir los contaminantes de las aguas pluviales urbanas de entrada. La profundidad máxima de encharcamiento ofrece la posibilidad de amortiguar los hidrogramas entrantes y no es tan profunda como para afectar la salud de la planta. El agua acumulada también se disipará en un tiempo prudente (menor a dos días) que mantiene la biodiversidad y evitará que el sistema de biorretención se convierta en una zona de proliferación de mosquitos. La capa de plantación asegura que el volumen de entrada sea almacenado adecuadamente, así mismo, da capacidad de crecimiento a la planta y mantiene la humedad en el suelo durante periodos secos.

El diseño de las capas de suelo está basado en la ley de Darcy, los sistemas de biorretención incorporan una capa de gravas debajo de la estructura y una capa de arena en el fondo, esto logra que la escorrentía captada se filtre lentamente a través del lecho de tierra de una manera similar a un filtro.

La ecuación (2) es utilizada para estimar la superficie mínima, luego, la capacidad de retención se compara con la del volumen de diseño. Cuando la estructura se utiliza como un filtro, sólo se utiliza el volumen de tratamiento para el dimensionamiento.

$$A_s = \frac{V_t(d_b)}{k} (h + d_b)t \quad (2)$$

Dónde:

$A_s$ : Área superficial del lecho filtrante ( $ft^2$ )

$V_t$ : Volumen de tratamiento de calidad de agua ( $ft^3$ )

$d_b$ : Espesor de la capa de suelo ( $ft$ )

$h$ : Profundidad del lecho filtrante ( $ft$ )

$k$ : Coeficiente de permeabilidad del medio filtrante para el agua ( $ft/d$ ), para los lechos de siembra del suelo,  $k = 0.5 ft/d$  (valor promedio para suelo franco-limoso).

$h$ : Altura promedio del agua sobre el lecho filtrante, calculada como  $\frac{1}{2}$  de la altura máxima de almacenamiento permitida. ( $m$ )

$t$ : Tiempo requerido para que el volumen de agua se filtre a través del suelo. ( $d$ )



El volumen de almacenamiento  $V_t$  es un factor decisivo en el dimensionamiento de la estructura BMP. Si el evento de lluvia de diseño, por ejemplo, es pequeño, la eficiencia del tratamiento se ve reducida ya que muchas tormentas excederán la capacidad del sistema. Por otro lado, si el evento de lluvia de diseño es muy largo, no se tendrá el tiempo mínimo de retención necesario para el tratamiento en los eventos cortos de lluvia. Es ineludible lograr un balance entre el volumen de almacenamiento y la eficiencia en el tratamiento de agua.

El tiempo de retención no debe exceder las 24 horas, y se considera que es adecuado para el tratamiento del agua. En promedio tardaría 12 horas para el drenado completo de la estructura.

#### 1.2.4. Dimensionamiento del Sistema de Biorretención Estándar

En general, todos los sistemas de biorretención se forman a partir de una pequeña depresión ubicada al costado de las vías, en zonas peatonales o en cercanía a las construcciones urbanísticas. Estos sistemas requieren de una superficie para el tratamiento y control de la escorrentía superficial, así mismo, su funcionamiento depende de la permeabilidad de los suelos que los componen y del suelo natural donde son cimentados.

La estructura que se presenta en este estudio está basada en lo que tradicionalmente se denomina *Rain Garden*, en combinación con los sistemas de filtros con caja para árboles, estos sistemas son unos de los más usados en todas partes del mundo. Los filtros con caja para árboles son sistemas de biorretención normalmente encerradas en cajas de concreto, recogen la escorrentía superficial de las vías en pequeños volúmenes (Kennedy/Jenks Consultants, 2007, pp. 3–10).

Se requiere dimensionar un sistema de Biorretención estándar que aproveche las áreas de uso en andenes para promover el almacenamiento, la infiltración y la evapotranspiración que, en conjunto, lograrán la mitigación del pico de escorrentía superficial local y un mejoramiento de la calidad del agua.

Una vez se produzca la lluvia, la estructura recibe la escorrentía superficial de la superficie de la vía, andenes o directamente desde el techo de una edificación. A través de una captación convencional, que puede ser del tipo ventana o con tuberías de conducción, el volumen de agua que escurre es almacenado en el suelo. Aprovechando la permeabilidad de los materiales granulares que la componen y la capacidad del suelo natural se infiltra en el subsuelo. Con ayuda de la vegetación dispuesta en los límites de las vías, se favorece la evapotranspiración, la retención y la infiltración.

Existe una cantidad importante de criterios usados en el dimensionamiento de sistemas de biorretención. Durante varias décadas investigadores de distintos países han hecho seguimiento del comportamiento de estos sistemas bajo diferentes condiciones de diseño. Finalmente, cada autor hace las recomendaciones del caso según su propio criterio. Uno de los documentos recopilatorios más importantes es el realizado por William C. Lucas donde se especifican los requerimientos básicos que se deben tener en cuenta al momento de dimensionar un sistema de biorretención, el documento recopilatorio es el resultado de la revisión de los manuales más importantes realizados sobre el tema, según Lucas, Los sistemas BMP se clasifican en cuatro grupos (Lucas, 2005):

- Zanjas, Pozos de Infiltración *Filter Strips*
- Canales Vegetales o de Filtración *Biofiltration Swales*
- Rain garden y otras estructuras retenedoras *Bioretention Facilities*
- Zanjas de Infiltración *Infiltration Trenches*

Este autor ha estudiado la posibilidad de mejorar los parámetros básicos de dimensionamiento, se ha apoyado en la literatura más reciente que puede ser aplicada, mostrando recomendaciones para las dimensiones en

planta, los niveles máximos de almacenamiento, la caracterización de los suelos que pueden ser usados y la selección apropiada de plantas.

Para su aplicación en la ciudad de Bogotá, se interpretan las recomendaciones dadas por los manuales especializados siguiendo las normativas suministradas para el espacio público y el manejo de la arborización en la ciudad de Bogotá.

#### 1.2.4.1. Altura de almacenamiento de agua sobre la estructura

Para el dimensionamiento de un sistema de biorretención se parte de las características hidráulicas de los suelos. Es importante considerar por lo menos una tasa de infiltración en la estructura que permita la descarga de esta en menos de 48 horas, la recomendación es mantener como mínimo una tasa de ½ pulgada por hora, que es aproximadamente 12.7 mm/h (Lucas, 2005, pp. 2–17).

Con una tasa de infiltración de ½" /h, y un tiempo de retención de 48 horas, se debe tener una profundidad de agua almacenada de 18" por cada pulgada que ingrese al sistema de biorretención, esto garantiza el correcto funcionamiento de la estructura, sin embargo, resulta excesivo para la supervivencia de las plantas; la recomendación usual de lámina libre almacenada es de 6" (Tabla 6). Si se considera que la estructura tiene sub-drenaje es posible usar valores superiores de lámina de agua almacenada.

Usando la clasificación de suelos del USDA y lo recomendado por el manual de Maryland (Maryland Department of the Environment, 2009b, p. D13.2), se puede determinar la altura máxima de pondaje para la tasa de infiltración en cada uno de los suelos así:

Tabla 5. Altura de Almacenamiento Máxima usando la Clasificación USDA (FAO, 2009, p. 39)

Clasificación según textura del Suelo USDA	Tasa Mínima de Infiltración (mm/h)	Altura Máxima de Almacenamiento (mm)			Grupo Hidrológico
		Para un Tiempo de 24 h	Para un Tiempo de 48 h	Para un Tiempo de 72 h	
Arena	210.0	5040	10080	15120	A
Areno Francoso	61.0	1464	2928	4392	A
Franco Arenoso	26.0	624	1248	1872	B
Franco	13.0	312	624	936	B
Franco Arenoso	7.0	168	336	504	C
Franco Arcillo-arenoso	4.0	96	192	288	C
Franco Arcilloso	2.0	48	96	144	D
Franco Arcilloso-limoso	1.5	36	72	108	D
Arcillo Arenoso	1.2	29	58	87	D
Arcillo limoso	1.0	24	48	72	D
Limo	0.5	12	24	36	D

Para suelos de los grupos A B y C, es posible mantener una altura de pondaje de hasta 30 cm, lo que permitiría utilizar estos suelos y cumplir con el tiempo de retención recomendado de 48 horas. Actualmente, y siguiendo la recomendación de (Lucas, 2005), los suelos seleccionados y compuestos con materiales vegetales utilizados

como medio para las plantas, pueden llegar a una tasa de infiltración de 60 mm/h, lo que significa que se tendrá una profundidad hidráulica de 30 cm, que también resulta óptima para la permanencia del agua en la estructura, sin embargo, la tasa de infiltración en la estructura, al no tener sub-drenaje, depende fundamentalmente del suelo de cimentación, en Bogotá los suelos más comunes son los suelos duros donde predominan las arcillas pre-consolidadas o éstas con intercalaciones de arena (Ingeominas, 1996) lo que resulta en una altura máxima de almacenamiento de 20 cm (análogicamente, con un suelo franco arcilloso arenoso Tabla 5), basado en lo anterior, se puede optar por un valor máximo de almacenamiento de **10 cm**.

#### *1.2.4.2. Dimensionamiento de la Superficie de Biorretención*

Gracias a la superficie de retención es posible tener una mayor evaporación y almacenamiento del volumen tratado o amortiguado. Las dimensiones en planta están establecidas por los manuales locales y están basadas principalmente en el volumen y el área aferente de captación, así mismo, depende de la distribución urbanística de la zona. Uno de los principales grupos de estudio (Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland, 2007) recomienda un ancho entre 3 y 4.5 metros con una longitud de entre 9 y 12 metros del mismo modo que lo recomienda EPA y otros centros investigadores.

En Bogotá, el espacio público peatonal está normalizado y uno de los documentos más reconocidos son las especificaciones dadas por la Secretaría Distrital de Planeación, teniendo en cuenta que este tipo de estructuras son utilizadas principalmente en el espacio público, se sigue la propuesta dada por la cartilla de andenes de la ciudad de Bogotá donde se reglamentan las dimensiones de todas las estructuras que componen el espacio público peatonal (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007).

La estructura principalmente recogerá la escorrentía superficial de las vías, los separadores viales en Bogotá tienen un ancho comprendido entre 3.20 y 4.20 m (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007), este es un espacio que puede ser usado para instalar un sistema de biorretención, así mismo, las alamedas pueden llegar a tener hasta 10 m de ancho incluyendo la ciclo-ruta y zonas blandas.

El andén es un espacio destinado al tránsito de peatones, son franjas paralelas a las vías, pueden estar constituidos por zonas duras y blandas, o una combinación de estas. Se ha establecido que 2.0 m son suficientes para el tránsito peatonal, sin embargo, pueden llegar a tener 1.60 m en zonas de bajo tránsito peatonal (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007, p. 82). En algunos casos (Anden tipo B165 y B170), (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007)), los andenes deben tener por lo menos 5 metros de ancho, lo que permite agregar zonas blandas para embellecer el paisaje urbano y que también pueden ser usadas para la retención e infiltración.

En el sentido transversal, es posible incluir zonas blandas de hasta 2.5 m en las soluciones de movilidad peatonal que incluyan zonas duras y empedradas, el área útil del sistema de biorretención podría tener hasta **2.0 metros** de ancho medidos en la parte externa del sistema, con lo que se asegura el espacio mínimo de tránsito peatonal de 1.6 m.

En el sentido longitudinal, se recomiendan zonas verdes separadas por lo menos cada 10 metros, y con una longitud máxima de 8 metros en el sentido de la vía (Figura 12), podría adoptarse un largo de **3-5 metros**, con ello se tiene un área externa de la estructura de 2x3 o 2x5 m, que está dentro de las recomendaciones mencionadas en la Tabla 6.

Las dimensiones finales de la estructura se seleccionan según los elementos prefabricados disponibles y recomendados por (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007).

Figura 12. Detalle de Combinación de Áreas Duras y Blandas B165 (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007)

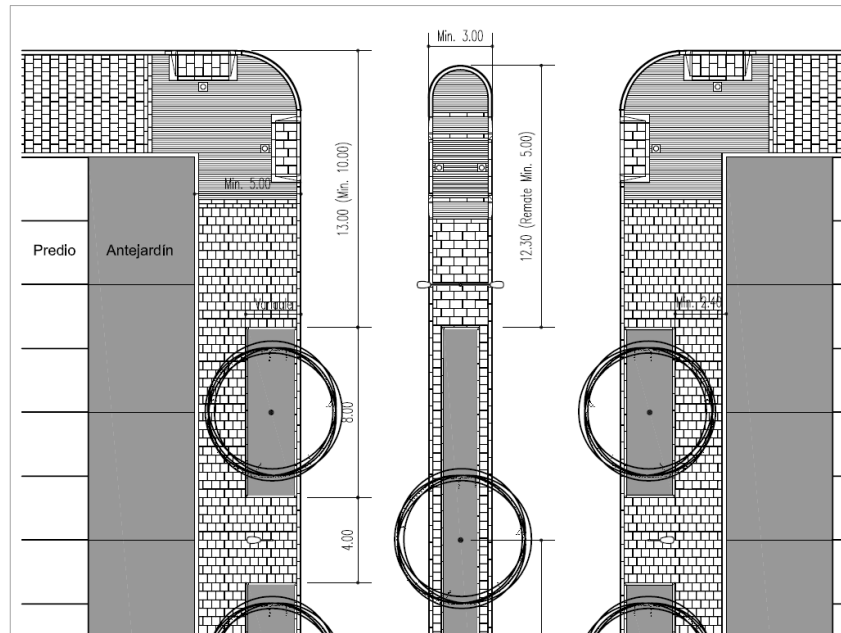


Tabla 6. Criterios de Dimensionamiento Biorretención (Lucas, 2005, p. A-4)

Criterios de Dimensionamiento para Sistemas de Biorretención								
Referencia	Área Máxima de Drenaje, Recarga	Pre tratamiento	Vertedero	Profundidad del Flujo de pondaje	Capa mínima suelo de plantación	Largo	Ancho	Pendiente de Paredes
<i>Prince George's County DER, MD</i>	El área de Biorretención será del 5% a 7% del área desarrollada	Zanja filtrante, Diafragma de gravas, cama de arena >1"	Berma que re direcciona el flujo al drenaje urbano	<0.15 m	>1.2 m	>9-12 m	>3-4.5 m	>3:1
<i>Pennsylvania</i>	El área de Biorretención será del 5% a 7% del área desarrollada	Zanja de protección, cama de arena opcional	Igual a PGDER	<0.15 m	>1.2 m	>9-12 m	>3-4.5 m	>3:1
<i>FX Browne, Inc</i>		Zanja filtrante, Diafragma de gravas, cama de arena >1"	Igual a PGDER	<0.15 m	>1.2 m	>9-12 m	>3-4.5 m	>3:1
<i>US EPA</i>	0.1 -0.45 Ha	Zanja filtrante, Diafragma de gravas, cama de arena >1"	Igual a PGDER	<0.15 m	>0.60 >1.2 m	>9-12 m	>3-4.5 m	>3:1
<i>New York</i>	< 4.05 Ha 75% del Volumen de tratamiento de calidad de agua	Zanja de filtro, separador de nivel diafragma de gravas, caída de 6" en la entrada	Sí	<0.15 m	1.2 m	Dimensionamiento basado en la ley de Darcy.		

Criterios de Dimensionamiento para Sistemas de Biorretención								
Referencia	Área Máxima de Drenaje, Recarga	Pre tratamiento	Vertedero	Profundidad del Flujo de pondaje	Capa mínima suelo de plantación	Largo	Ancho	Pendiente de Paredes
<i>Delaware</i>	Surface área x 5% x Rv	Zanja filtrante, Diafragma de gravas, cama de arena >1"	Igual a PGDER	<0.15 m	1.2 m	> 12 m	> 4.5 m	< 3:1
<i>Vermont</i>	$Af = (WQv) (df) / (k (hf + df) (tf))$	Zanja filtrante, < 1% de pendiente, para transportar el pico de escorrentía y proteger de la erosión, diafragma de gravas.	Vertedero con una cabeza de 6"	<0.15 m	0.80 to 1.2 m	Largo: Ancho = 2:1		3:1
<i>LA Bioretention Manual</i>	El área de Biorretención será del 5% a 7% del área desarrollada	Zanja filtrante, Diafragma de gravas, cama de arena >1"	Vertedero de emergencia con un cabeza de 6"	<0.15 m o <0-30 m si se utiliza un drenaje subterráneo	>1.2 m	>12 m	4.5-8 m	>3:1
<i>Growing Greener in Your Rappahannock River Watershed</i>	2000 sq ft per impervious acre	Zanja de infiltración		0.15 a 0.25 m	> 1.0 m			
<i>Georgia</i>	>0.40 Ha	3% Zanja de infiltración	Vertedero de emergencia con un cabeza de 6", o sub drenaje de 4x8 m.	<0.15 m	>1.5 m	Largo: Ancho = 2:1		>3:1

Criterios de Dimensionamiento para Sistemas de Biorretención								
Referencia	Área Máxima de Drenaje, Recarga	Pre tratamiento	Vertedero	Profundidad del Flujo de pondaje	Capa mínima suelo de plantación	Largo	Ancho	Pendiente de Paredes
<i>NC Cooperative Extension Service</i>	5-7% del área de drenaje, o para almacenar los primeros 2.25 cm de precipitación.		Sí, vertedero o tubería en caja	0.15 a 0.3 m, en promedio 0.25 m.	1-1.5 m 0.6-1.2 m si se usa suelo de siembra grueso	Dimensionamiento basado en la ley de Darcy		
<i>Vancouver</i>	El área de Biorretención será del 5% a 7% del área desarrollada	Zanja de infiltración o canal vegetado y diafragma en gravas	Gravilla en drenaje cortina	<0.15 m	>1.2 m	>5 m	>3 m	
Idaho	El área de Biorretención será del 5% a 7% del área desarrollada			<0.15 m	>1.2 m	Área superficial < 0.40 Ha		<4%

Criterios de Dimensionamiento para Sistemas de Biorretención								
Referencia	Área Máxima de Drenaje, Recarga	Pre tratamiento	Vertedero	Profundidad del Flujo de pondaje	Capa mínima suelo de plantación	Largo	Ancho	Pendiente de Paredes
Stormwatercenter.net	< 2.0 Ha	Canal vegetal, Zanja filtrante, o manto en gravas	Exudación a través de una franja filtrante de gravas	0.15 m a 0.25 m		El área superficial corresponde a un 5 - 10 % de área impermeable		5%

Criterios de Dimensionamiento para Sistemas de Biorretención								
Referencia	Área Máxima de Drenaje, Recarga	Pre tratamiento	Vertedero	Profundidad del Flujo de pondaje	Capa mínima suelo de plantación	Largo	Ancho	Pendiente de Paredes
Minnesota (MNUSS)	< 0,8 Ha	Zanja filtrante, Diafragma de gravas, cama de arena >1"	Recomendado para grandes aguaceros	0.15 m a 0.25 m	> 1.20 m	El área superficial corresponde a un 5-10 % de área de drenaje		5%, o una relación 3:1
US EPA	< 2.0 Ha	Cuneta perimetral de los sistemas de drenaje de aguas lluvias		Aprox. 0.15 m	1.20 m	11.5 m	3.65 m	
New Jersey	El área de Biorretención será del 5% a 7% del área desarrollada	Zanja filtrante, Diafragma de gravas	Cortina de grava de drenaje, Orificio de drenaje sobre la máxima altura de pondaje	< 0.15 m	0.90 a 1.20 m	> 12 m	> 3 m	>3:1
Washington		Zanja filtrante	Vertedero Triangular		0.9 a 2 m	Dimensionamiento basado en la ley de Darcy		<3:1
Claytor & Schueler	> 0.4 Ha. Varía dependiendo del volumen de escorrentía superficial que se infiltre.	Diafragma de gravas, zanja filtrante, cama de arena	Cortina de grava de drenaje, Orificio de drenaje sobre la máxima altura de pondaje	< 0.15 m	> 1.20 m	>4.5 m; Dimensionamiento basado en la ley de Darcy; 3-4% de área de drenaje	>3m - 4.5 m; Dimensionamiento basado en la ley de Darcy	<4:1
EQRI, 2001								



Criterios de Dimensionamiento para Sistemas de Biorretención								
Referencia	Área Máxima de Drenaje, Recarga	Pre tratamiento	Vertedero	Profundidad del Flujo de pondaje	Capa mínima suelo de plantación	Largo	Ancho	Pendiente de Paredes
EPA Manual	Áreas muy pequeñas	Zanja filtrante, Diafragma de gravas		< 0.15 m				<3:1
Maryland	< 4 Ha	Diafragma de gravas, zanja filtrante, cama de arena opcional	Pozo de amortiguación y tubería de salida	15 m a 30 m	Capa orgánica: 5 - 10 cm. Suelo de siembra: 0.7 - 1.2 m. Capa de sub-drenaje de gravas: 20 cm	Variable, pero sigue una proporción 2:1		
Meridian Consulting Engineers, LLC		Diafragma de gravas, zanja filtrante, cama de arena		0.15 m	1.0 m	Aprox. 25 m	4.5 m ancho superior, 2.5 m ancho inferior	4:1 máx.

#### 1.2.4.3. *Espesor de las Capas de Suelo*

**Capa de suelo de plantación:** puede ser tan variable como las diversas especies que se pueden plantar en ella, uno de los criterios establecidos para la profundidad de este elemento es la capacidad de retener humedad y la tasa de infiltración que este suelo posea. Siguiendo las recomendaciones propuesta en la Tabla 6, la profundidad de la capa de suelo de siembra está comprendida entre 0.60 – 1.5 m, una capa poco profunda no permitiría el apropiado desarrollo de la raíces de las plantas; es necesario que este medio de tierra tenga una longitud equivalente a la raíz sin ningún tipo de restricción en el desarrollo (Mutis, 2008, p. 37), esta característica depende de cada plantación en particular, por tanto, una capa de suelo de siembra de mayor longitud permitiría adoptar especies arbóreas más grandes.

En lo recomendado por la Secretaría Distrital de Planeación las zonas blandas que incluyan vegetación deben tener contendedores de raíces de tal modo que estas no afecten las bases, sub-bases de las vías o algún otro elemento estructural cercano. La recomendación que hace el Jardín Botánico de Bogotá, es de un volumen mínimo del contenedor de raíces de 1 metro cúbico, con una profundidad mínima de 1 m y que debe ser proporcional al tamaño del árbol a plantar, llegando a tener valores superiores (Mutis, 2008, p. 40).

La mayoría de las plantas que se pueden implementar en los andenes son árboles con una intrusividad baja a media y una característica de raíz de superficial y en algunos casos media (Mutis, 2008, p. Tabla 5), con lo cual, una profundidad de suelo de siembra de **1.00 m** sería suficiente.

**Cama de arena:** este componente es fundamental para asegurar la permeabilidad del medio, en algunos casos es opcional su uso. Generalmente puede tener espesores de entre 20 y 40 cm, en este caso se usa un espesor de **0.20 m** que es lo recomendado para filtros usados en jardines de lluvia (ver Tabla 6).

**Zona de recarga:** este componente es utilizado para recolectar y redistribuir el volumen de agua captado, está compuesto principalmente por gravas de gran diámetro (2"-8"). El espesor de la capa de almacenamiento se determina con base en las características hidráulicas del suelo de cimentación y la altura máxima de pondaje en la estructura.

#### 1.2.4.4. *Selección de los Suelos*

**Arena:** es un elemento fundamental en el sistema de biorretención, al ser un material granular mejora la permeabilidad del sistema, debe seguir las especificaciones de tamaño dada por la norma ASTM (*American Society for Testing and Materials*) y corresponde a la especificación de arena usada en la mezcla de concretos ASTM C-33. Con un módulo de finura de 2.75 o mayor, el material debe estar comprendido entre los tamices 0.02" – 0.25"(tamices N°4 a N°40), se acepta únicamente arena a base de sílice (Lucas, 2005, pp. 2–21).

**Turba/compost:** material de abono resultante del proceso de transformación aeróbica de los materiales orgánicos contenidos en los residuos por medio de la actividad de los microorganismos.

**Tierra negra:** material constituido por limos arenosos orgánicos y humus, idónea para la siembra de cualquier especie vegetal, debe estar suelta, poco cohesiva, textura franca (comprobación al tacto), libre de materiales distintos a los provenientes del subsuelo, no debe contener materiales con diámetro mayor a 5 cm, sin presencia de organismos patógenos, buena capacidad de filtración y alta permeabilidad, además, debe cumplir con los lineamientos de calidad establecidos por el jardín botánico de Bogotá (Mutis, 2008).

**Cascarilla de arroz:** Cascarilla de arroz prensada en sacos de polietileno micro-perforado, libre de organismos fito-patógenos, con humedad menor al 5%. Este componente cumple con la función de retener y conservar la humedad en el suelo, asegura también que el suelo de plantación se mantenga suelto y garantice el escurrimiento, de acuerdo a la investigación realizada por Dr. Calderón Labs (Calderon, 2014) la cascarilla de

arroz quemada brinda mejores características de adsorción y de filtración que la convencional, se usa entonces cascarilla de arroz quemada para lograr un apropiado comportamiento del sustrato de plantación.

**Geo-textil:** el tejido de geo-textil se utiliza como un separador de las capas de suelos con gran diferencia de permeabilidad únicamente para evitar la mezcla de materiales y la migración de finos. La especificación más sobresaliente de este elemento es su permeabilidad, este debe tener, al menos, una tasa de flujo de 110 gal/min/pie cuadrado o 4482 L/min-m<sup>2</sup> (Lucas, 2005).

**Sustrato de plantación o Suelo de Retención:** De acuerdo a lo recomendado para la siembra en zonas blandas para uso en espacio público en Bogotá, el sustrato de plantación es una mezcla de tierra negra tamizada enriquecida con abono orgánico y material vegetal como puede ser la cascarilla de arroz en proporción 8:1 (Mutis, 2008, p. 37), sin embargo, en lo propuesto por (CIRIA, 2007, pp. 11–6) el suelo debe ser lo suficientemente permeable para lograr que el agua pase a través de este y se deposite en la zona prevista para la recarga, las proporciones recomendadas son las de la Tabla 3. En Maryland 2007, los suelos usados son seleccionados dependiendo de su permeabilidad y corresponden a la clasificación USDA en, areno franco, franco arenoso y franco de la Tabla 5, en proporciones similares a la Tabla 3 (Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland, 2007, p. 65).

En EPA 2004, se considera que el suelo de plantación puede ser una proporción de suelos areno franco y franco arenoso, o una mezcla de limo y arena, donde se debe tener como mínimo una proporción del 50%-70% de arena en volumen, el contenido de arena para estos suelos debe ser de por lo menos un 10% en volumen (EPA, 2004b, pp. 7–12).

Una mezcla de suelos franco arenoso puede ser usado para la capa de plantación si se mantiene una tasa de infiltración que permita la descarga en menos de 48 horas (North Carolina State University et al., 2011). Los sistemas de biorretención deben incluir una mezcla de suelo tamizado que consiste en una combinación bien mezclada de 50 a 60% de arena limpia, un 20-30% abono orgánico, y un 5-20 composta y / o turba (Kennedy/Jenks Consultants, 2007, pp. 3–3).

*Tabla 7. Medio Filtrante en Sistemas de Biorretención*

MEDIO FILTRANTE EN SISTEMAS DE BIORRETENCIÓN	
REFERENCIA	MEDIO FILTRANTE / CAPAS DE SUELO
Prince George's County DER, MD	Cobertura vegetal /mulch, suelo de plantación, cama de arena
Pennsylvania Manual	Cobertura vegetal /mulch, suelo de plantación, cama de arena
FX Browne, Inc	Cobertura vegetal /mulch, suelo de plantación, cama de arena
US EPA (EPA 2, EPA 3, EPA 4)	Franco arenoso, Arenoso Francoso, Franco con un porcentaje de limo entre 10-25%.
New York (NYSDEC)	Suelo de plantación con mantillo vegetal
Delaware (Raymond Green)	Cobertura vegetal /mulch, suelo de plantación, cama de arena
Vermont (VTDEC)	Mezcla uniforme de suelo de siembra, mantillo, diafragma en gravas y cortina de drenaje
LA Bioretention Manual	Mantillo vegetal y mezcla uniforme de suelo de plantación

MEDIO FILTRANTE EN SISTEMAS DE BIORRETENCIÓN	
Growing Greener in Your Rappahannock River Watershed	Mantillo vegetal y mezcla uniforme de suelo de plantación grueso, cama de arena
Georgia (ARC, 2001)	Suelo de plantación y cama de rocas
Stormwatercenter.net	Mantillo, matriz de arena y tierra
Minnesota (MNUSS)	Mantillo vegetal y suelo de plantación
US EPA (EPA 1)	50% arena, 20-30% suelo superficial, 20-30% compost
New Jersey (NJDEP, 2000)	Mantillo vegetal, suelo de plantación con un porcentaje de 10-25% de limo, 30-55% limo, 35-60% arena
Washington (WSDE, 1999)	Franco arenoso o Arenoso Francoso
Claytor & Schueler (CWP, 1996)	Mantillo <3" de espesor. Suelo: Franco arenoso, areno Francoso, franco, o mezcla de suelo Francoso/arena (mínimo 35-60% de arena, <25% arcilla)
Vancouver (GVSD, 1999)	Franco arenoso o Arenoso Francoso
Maryland (MDE, 1999)	Suelo: mezcla uniforme, libre de objetos, granos, mayores a una pulgada de: Franco arenoso, arenoso Francoso, franco, mezcla de franco/arena; 30 - 65% arena; <25% arcilla. Mantillo: Vegetal, únicamente de madera triturada.
Meridian Consulting Engineers, LLC	Franco arenoso, arenoso Francoso, franco, Mulch: madera triturada con edades 6- 12 meses

Una composición adecuada en el medio de retención garantiza un apropiado funcionamiento del sistema, es importante que se tenga un suelo que permita la descarga de la estructura dentro de las 48 horas siguientes a la tormenta. Muchos de los diseños de suelo han fracasado debido a la presencia de finos, es recomendable que exista un porcentaje adecuado de arena para evitar la colmatación.

La nutrición de las plantas debe realizarse con fertilizantes de liberación lenta, aunque lo más recomendado es usar compost en una capa superficial de hasta 2", de este modo se puede controlar la proliferación de maleza no deseada y la nutrición del arbusto leñoso del sistema. (California Department of Transportation, 2012, p. 19) El compost superficial puede ser removido y reemplazado en la etapa de mantenimiento, esto evita la colmatación del manto superficial.

Siguiendo lo recomendado anteriormente, y las especificaciones dadas en la Tabla 7, el suelo de plantación resultará en una mezcla uniforme compuesta de varios suelos (Figura 13):

#### **Arena 65 % en volumen**

**Tierra negra tamizada** mezclada con cascarilla de arroz en proporción 8:1 **35 % en volumen.**

**Cama de arena:** está compuesta en un 100% de arena limpia usada en la mezcla de concretos.

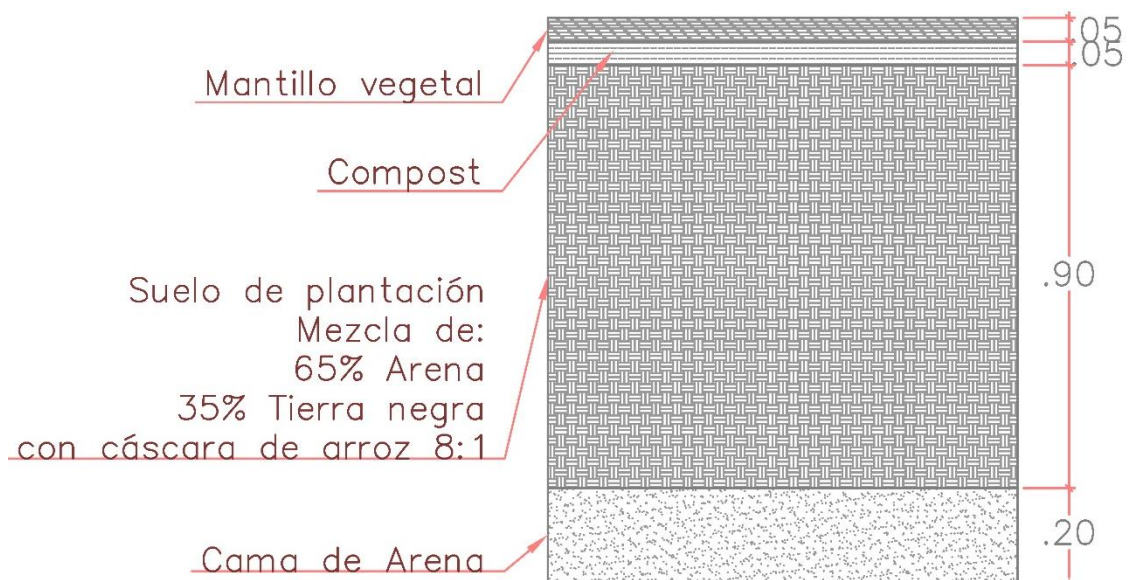
Además, se dispone una capa superficial de turba o compost de 5 cm de espesor. También, se debe agregar un Mantillo vegetal (*mulch*) como capa primaria, este debe mezclarse con gravas de 1-1.5" para evitar la socavación de la capa de plantación.

Los componentes deben ser mezclados mecánicamente hasta lograr una mezcla uniforme, teniendo en cuenta que se deben mezclar a humedades naturales y debe resultar una humedad homogénea, dependiendo de la sensibilidad del suelo a la humedad (Tabla 8) se debe tomar las precauciones necesarias en el mezclado. la compactación debe ser mínima, debe colocarse en capas de máximo 30 cm de espesor, el mantillo debe tener como máximo 7 cm de espesor (Lucas, 2005, pp. 2–24).

Tabla 8. Sensibilidad del Contenido de Humedad en los Suelos (Allerton & Pittner, 2010, p. 19).

Suelo	Sensibilidad del contenido de humedad
Arcillas	Muy sensible, pérdida considerable de la capacidad portante en pequeños incrementos de la humedad.
Limos	Muy sensible, pérdida considerable de la capacidad portante en pequeños incrementos de la humedad.
Material de relleno	Moderada a Muy sensible, dependiendo del tipo de suelo.
Arenas y Gravas bien gradadas	Baja a moderada, depende principalmente del contenido de materiales cohesivos.
Roca	Muy baja a moderada. Un material débil o altamente degradado será más susceptible a los cambios de humedad.
Materiales de relleno	Sensibilidad variable, depende de los materiales disponibles y que componen al material de relleno.

Figura 13. Diseño del Suelo Estructura Propuesta



#### 1.2.4.5. Elementos del Sistema de Biorretención

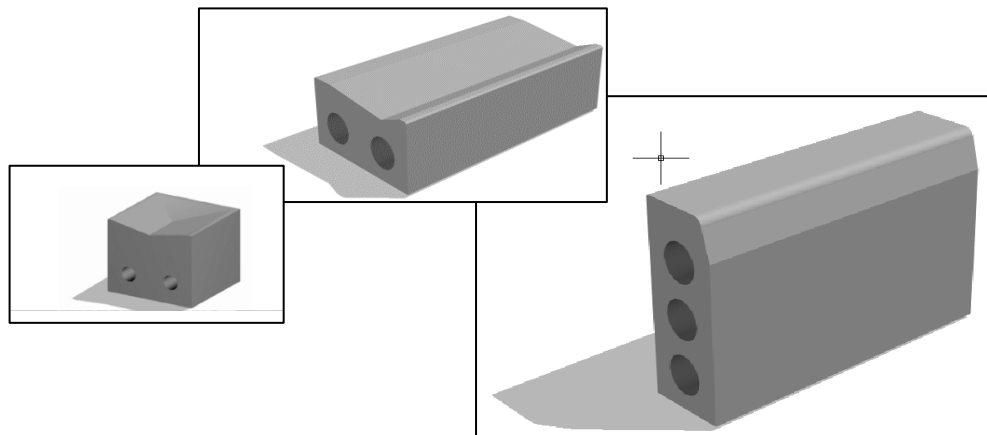
Sistemas de biorretención instalados en los suelos de sitios existentes con tasas de infiltración de 0,5 pulgadas/hora o más no requieren típicamente un sistema de desagüe inferior (Kennedy/Jenks Consultants, 2007, pp. 3–3), el sistema propuesto no llevará sub drenaje, sin embargo, llevará vertedero de excesos en cuyo caso tiene una mayor efectividad evitando que el agua se almacene hasta desbordar la estructura.

La captación, es uno de los elementos más importantes en el dimensionamiento de los elementos de drenaje urbano, ya que conduce adecuadamente la escorrentía. Debido a la cantidad de sólidos que puede transportar el agua lluvia es recomendable que se tenga dispuesto un método para la captura de sedimentos que prevenga la colmatación del sistema, de no ser posible, el mantenimiento adecuado de la estructura cumpliría el mismo papel.

La escorrentía superficial escurre por los puntos bajos de las vías y es captada por orificios enrejados que retienen los residuos y basuras de gran tamaño que la dirigen a los sumideros y demás estructuras convencionales. En pro de la estandarización en los sistemas de drenaje, la Secretaría Distrital de Planeación propone usar elementos prefabricados para la conducción de la escorrentía en las vías tales como cunetas, sardineles, sumideros etc.

Dentro de estas estructuras se puede aplicar el elemento prefabricado A-125 (Figura 14) que consiste en un bloque de concreto biselado en forma de canal triangular. Con el fin de dirigir el curso de escurrimiento de la escorrentía superficial a la captación se acopla con las piezas A-121 y para constituir la estructura de entrada a la estructura colectora.

Figura 14. Elementos Prefabricados para el Drenaje en Vías A-10, A-121 y A-125 (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007, p. 19,51,55)



El depósito de sedimentos puede ser opcional y depende en gran medida de la efectividad en el servicio de aseo de la ciudad. Es importante considerar que las basuras pueden llegar al sistema y ocasionar colmatación, se recomienda el uso de un pequeño tanque que retenga los sedimentos a modo de una criba, este elemento puede disponerse justo después de la captación, sin embargo, este componente debe ser evaluado en el momento de la construcción del sistema, por lo tanto, se debe tener en cuenta la eficacia en la recolección de basuras en la zona particular de estudio.

Existen varios modelos para el dimensionamiento de la captación, el más utilizado es el dimensionamiento basado en el caudal de entrada, también existe reglamentación referente al área transversal efectiva mínima que deben tener los elementos de drenaje que componen la captación. El método recomendado es el dimensionamiento de la captación con base en el caudal de entrada gobernado por la hidrología de la zona.

#### 1.2.4.6. Geometría del Sistema

La estructura general del sistema consiste básicamente de tres componentes:

- Componentes para la supervivencia de la vegetación
- Componentes para la retención e infiltración
- Componentes para un adecuado comportamiento hidráulico

Tal como se muestra en la Tabla 1 cada elemento que compone el sistema de biorretención tiene un propósito específico que garantiza el correcto funcionamiento del sistema en general. Dependiendo del área donde se localice es posible aprovechar algunos de los materiales circundantes en la construcción del sistema. Los componentes para la supervivencia de la vegetación dependen de la especie nativa a plantar, se recomienda consultar la guía de recomendaciones dada por el jardín botánico para la ciudad de Bogotá. Como se menciona en el capítulo 1.2.4.3 es necesario mantener el contenido adecuado de materia orgánica para la manutención de las plantas, la nutrición de estas se puede realizar con una capa de composta extendida sobre la última capa de suelo de plantación, sobre ella es posible realizar el riego de fertilizantes y abonos orgánicos necesarios para el desarrollo de las plantas.

Los componentes para la retención e infiltración consisten en las diferentes capas de suelo que conforman la estructura, la principal capa de suelo se refiere al sustrato de sustentación de las plantas y otra que mejora las condiciones de infiltración que en este caso corresponde a un lecho de arena y finalmente el volumen de retención se conforma con una capa de grava gruesa dispuesta sobre el suelo natural. Es recomendable utilizar un geotextil con el fin de evitar la mezcla entre los materiales y sobre todo desde el punto de vista hidráulico, permite una homogeneidad del flujo de drenaje bajo la mezcla de cultivo y la cama de arena (Angulo-Jaramillo, 2016).

En este caso se seleccionó, para el sustrato de las plantas, una mezcla de arena, tierra negra y cascarilla quemada de arroz, siguiendo las recomendaciones y consideraciones que se explican en el capítulo 1.2.4.4. los suelos se confinan en un contenedor de raíces que según (Mutis, 2008) debe tener un volumen de al menos un metro cúbico. De acuerdo a lo propuesto por (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007) el contenedor de raíces tipo B, particularmente el contenedor B-25 puede utilizarse para confinar los suelos que conforman la estructura de biorretención, en este caso se utilizan dos módulos B-25, teniendo en cuenta que el suelo de plantación tiene un espesor de 1 m, que en conjunto con el elemento B-25 se logra un volumen aproximado de suelo de cimentación de  $4 \text{ m}^3$  ( $1.36 * 2.96 * 1$ ).

Los componentes para un adecuado comportamiento hidráulico, hacen referencia a todos aquellos elementos de la estructura que se encargan del manejo del agua superficial que entra desde las vías y que sale al sistema tradicional de drenaje. Los elementos para la captación del agua pueden ser elementos tradicionales de ventana y criba o se puede combinar con otros procesos constructivos dependiendo de la zona de estudio.

Comúnmente, la escorrentía superficial es conducida por los elementos establecidos por el diseño de drenaje urbano tradicional. El dimensionamiento está basado en las áreas aferentes de las vías y la hidrología de la zona, generalmente, el caudal de escorrentía es calculado utilizando el método racional, utilizando la información hidrológica disponible, la ponderación del coeficiente de escorrentía y el área de drenaje aferente.

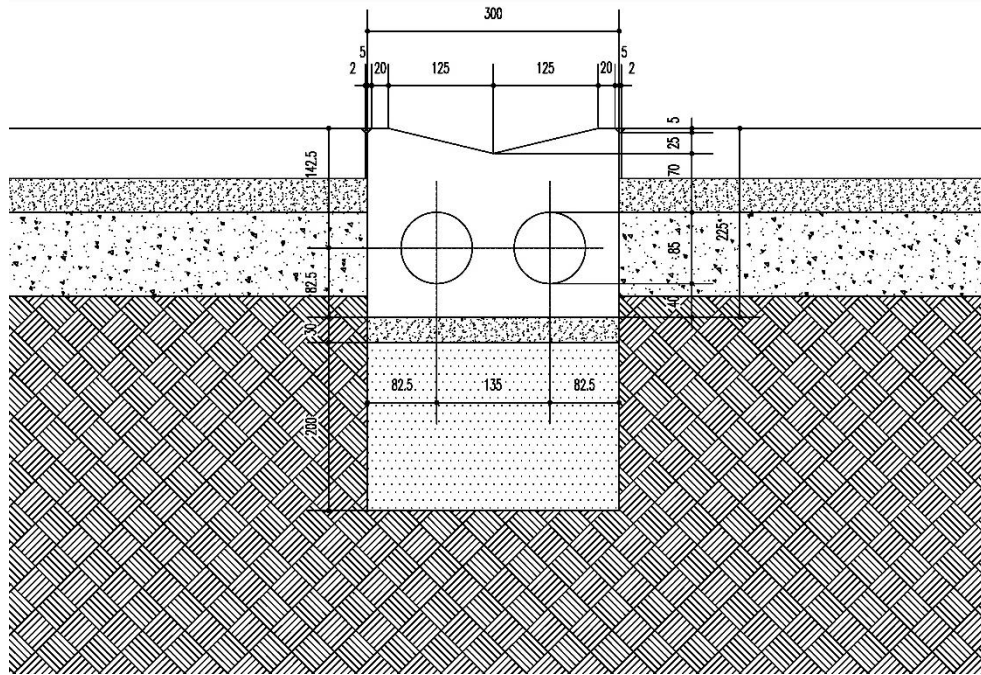
Si se tiene presente que las grillas de las vías (cuadras), así como el ancho estándar de calzada, se encuentran estandarizados, y, del mismo modo, la normativa colombiana establece que se deben colocar sumideros en cada esquina para garantizar que el paso peatonal no se vea afectado, por lo tanto, el máximo de área aferente correspondiente a un sumidero será: longitud de la vía \* ancho de vía, y a su vez, el coeficiente de escorrentía tendrá un valor máximo de 0.80, suponiendo que el área está cubierta en su totalidad por asfalto u otro material impermeable. Estas condiciones hipotéticas muestran un orden de magnitud de lo que sería el caudal máximo

que se puede generar en la zona de estudio, tentativamente, se puede hablar de un caudal máximo de entrada a la estructura de biorretención.

Se puede pensar que dada la distribución urbanística de las ciudades el caudal máximo a evacuar depende principalmente del ancho admisible de inundación de cada vía, es decir, de la capacidad máxima permitida, a partir de este punto, la vía estará inundada. La capacidad máxima permitida en una vía urbana obedece al tipo de flujo que se desarrolla sobre la vía (subcrítico, crítico, supercrítico) de las pendientes longitudinal y transversal, el ancho permitido de encharcamiento y de la geometría de la cuneta (Leidy Franco, 2015, p. 70).

La cuneta, que conduce la escorrentía al sistema de biorretención se selecciona siguiendo las recomendaciones de la cartilla de andenes, dentro de las propuestas planteadas en este documento se elige el elemento A 120 que tiene la siguiente geometría en mm (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007):

Figura 15. Elemento A-120 para Cuneta (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007)

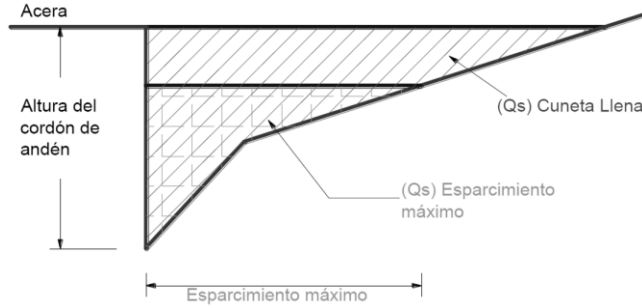


Siguiendo la recomendación de la norma NS-047 el máximo ancho de esparcimiento T de inundación será de 1.5 m para zonas comerciales y 2.0 m para zonas residenciales, se opta por tomar un valor máximo de 1.50 m (EAAB, 2009). En los sistemas de biorretención, se recomiendan pendientes longitudinales bajas, mínimo 2% y máximo del 20 % (Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland, 2007, p. 42,51; EPA, 1999, p. 2).

El flujo en la cuneta es un flujo gradual espacialmente variado, dado que en la medida que se avanza en sentido longitudinal el área de aporte se incrementa, es decir, el caudal crece (si se tiene en cuenta que el tiempo de concentración es breve no existirá amortiguación considerable y el caudal crece en el sentido longitudinal de la vía). Si se considera una situación hipotética de flujo uniforme el problema se simplifica considerablemente la Figura 16 muestra dicha hipótesis.



Figura 16. Capacidad Hidráulica de la Calle (Leidy Franco, 2015)



Bajo condiciones permanentes, el caudal entonces será la suma del caudal  $Q_w + Q_x$ . Que son los caudales frontal y lateral respectivamente, por lo tanto, se tienen dos condiciones de la lámina de agua que dependen del esparcimiento permitido: esparcimiento admisible y esparcimiento de cuneta llena (Leidy Franco, 2015).

Además, en la cuneta se pueden presentar tres condiciones de flujo: subcrítico, crítico y supercrítico, la condición que gobierna está definida por la pendiente longitudinal de la vía, o del área cercana, que debe estar comprendida entre el 2 -20 %. El control de flujo a la entrada de la estructura de biorretención entonces puede ser la profundidad crítica o la profundidad normal.

El problema del caudal máximo que podría transportar la cuneta, y que sería el máximo valor admisible de entrada a la estructura de biorretención, depende de la condición de energía específica mínima.

En este caso se conoce la geometría del canal (Figura 17) que resulta de sección compuesta y el valor de lámina de agua correspondiente al ancho recomendado de inundación y teniendo en cuenta que la pendiente del bombeo transversal de la vía es de 2%, se puede estimar el valor del caudal que transporta la cuneta. Para determinar el caudal máximo se debe cumplir relación de flujo crítico (Ecuación (3)) o normal (Ecuación (4)):

$$\frac{A^3}{T} = \frac{\alpha Q_{max}^2}{g} \quad (3)$$

$$AR_h^{2/3} = \frac{Qn}{S^{1/2}} \quad (4)$$

Dónde:

$A$ : Área transversal ( $m^2$ )

$T$ : Ancho superficial (m)

$g$ : Aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )

$Q_{max}$ : Caudal máximo ( $m^3/s$ )

$R_h$ : Radio hidráulico (m)

$Q$ : Caudal Normal ( $m^3/s$ ) con  $C_0 = 1$

$n$ : Coeficiente de Manning.

$S^{1/2}$ : Pendiente de la línea de energía o solera del canal (m/m)

La ecuación (3) se cumple para la condición de número de Froude igual a 1, con lo que resultará el caudal máximo para una condición de energía específica dada, se supone entonces que la altura y apropiada para mantener un ancho de inundación sobre la vía de 1.50 m corresponde a la profundidad crítica, con lo que se puede calcular el caudal máximo para esa condición de lámina de agua, sin embargo, la energía disponible puede representar una condición de flujo normal, es decir, existe una lámina normal que satisface la condición de energía que muestra la ecuación (3), por lo tanto, se debe calcular la profundidad normal, correspondiente al caudal máximo, con la condición de energía dada por la pendiente del canal. Esta profundidad normal puede

estar localizada en el ramal subcrítico o supercrítico de la curva de energía específica, si la profundidad normal es menor que la profundidad crítica la condición de flujo del canal es supercrítica, lo que quiere decir que la energía disponible es tal que se está trasportando el caudal máximo calculado con la ecuación (3), por el contrario, si la profundidad normal es mayor que la profundidad crítica el caudal transportado en el canal es el que resulta de la ecuación (4) y debe ser menor que el caudal máximo y corresponde a la condición energía dada por la pendiente del canal.

El caudal normal se calcula con la expresión de Manning-Strikler teniendo en cuenta que es un canal de sección compuesta tal como se muestra en la ecuación (5), la Tabla 9 muestra las propiedades geométricas de las diferentes secciones, así como el factor  $K_i$  de la expresión de Manning, finalmente se presenta en la el cálculo del caudal máximo,  $y_c$ , caudal normal y  $y_n$ .

$$Q = \left[ \sum_1^i K_i \right] S_o^{1/2} \quad (5)$$

Donde:

$Q$ : Caudal normal de Manning,  $m^3/s$

$$K_i = \frac{A_i R_h^{2/3}}{n}$$

$A_i$ : área de la sección  $i$  en  $m^2$

$R_h$ : Radio Hidráulico de la sección  $i$  en  $m$

$n$ : Coeficiente de Manning de la sección  $i$

Figura 17. Geometría de la Cuneta A-120 para un Ancho Admisible de Inundación  $T=1.50$  m

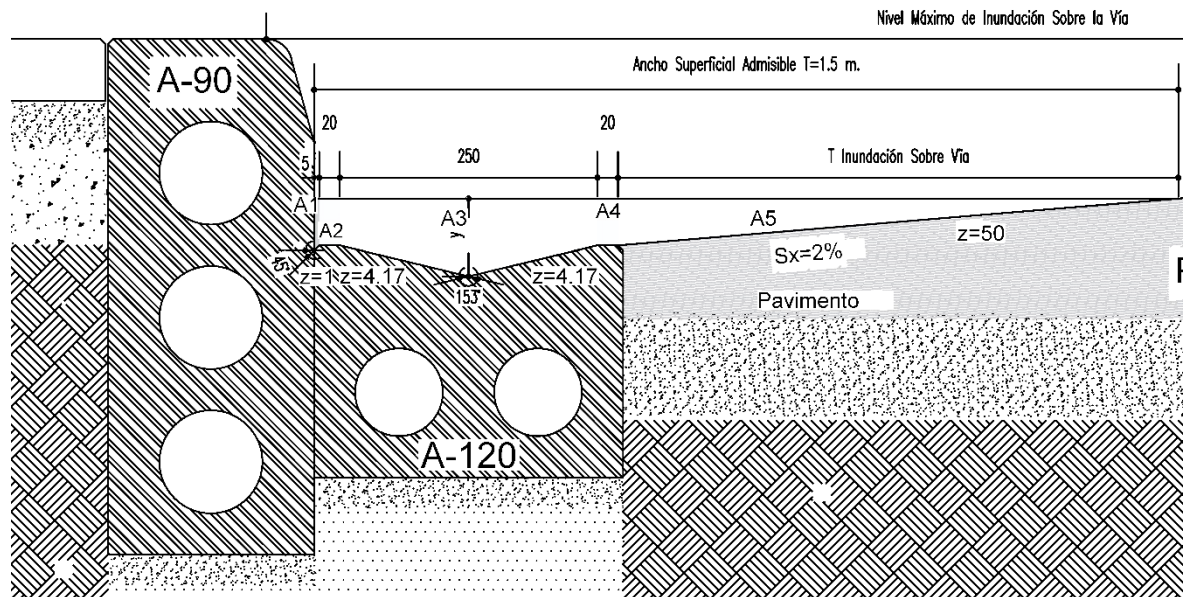


Tabla 9. Cálculo de Propiedades Geométricas de la Cuneta A-120

Sec.	Sección	Sub-Área	zi	zd	b	h	Sub Área	Área m <sup>2</sup>	T	P	Pneto	Rh	n	Ki
					m	m			m	m	m			
A1			0	0	0.005	0.0241	0.0001205	0.0001330	0.0050	0.0532	0.0362	0.00368	0.013	0.000244
			1	0	0	0.005	0.0000125		0.00050	0.0121				
A2			0	0	0.02	0.0241	0.000482	0.0004820	0.0200	0.0682	0.0200	0.02410	0.013	0.003093
A3			0	0	0.25	0.0241	0.006025	0.0097738	0.2500	0.2982	0.2570	0.03803	0.013	0.085019
			4.17	4.17	0	0.03	0.0037487		0.2499	0.2570				
A4			0	0	0.02	0.0241	0.000482	0.0004820	0.0200	0.0682	0.02	0.02410	0.013	0.003093
A5			50	0	0	0.0241	0.0145202	0.0145203	1.2050	1.2293	1.2052	0.01205	0.016	0.047693
								0.0254	1.50	1.538		0.1391		

Tabla 10. Cálculo del Caudal Máximo

Caudal m <sup>3</sup> /s							
So	Flujo Crítico	Flujo Uniforme	Yc	yn	A	P	Rh
m/m	$A^3/T = \alpha Q^2/g$	$AR^{2/3} = Qn/S^{1/2}$	(m)	(m)	(m <sup>2</sup> )	(m)	(m)
0.02	0.01034	0.01967	0.0541	0.0490	0.0184	1.2804	0.0144

La Tabla 10 muestra que la profundidad normal calculada con el caudal máximo resultado de la ecuación (3) y para una condición de pendiente del 2%, es menor que la profundidad crítica, resultado del supuesto de cuneta llena con un ancho superficial de 1.50 m, lo que indica que con una pendiente del 2% la condición de flujo en el canal es una condición supercrítica, por lo tanto, el caudal transportado es el máximo calculado con la ecuación (3) y será el mismo para cualquier condición superior de pendiente ya que al aumentar la pendiente la condición de flujo será cada vez más supercrítico y el caudal transportado en el canal será el máximo para cualquier condicione de pendiente mayor a la crítica.

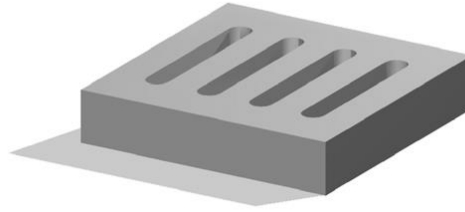
Se adopta entonces un caudal de 10.34 Lps para el dimensionamiento de los elementos de la estructura como son: vertedero de excesos, tubería de drenaje, desarenador y la captación.

Se propone que la captación se realice con vertedero lateral (ventana) y rejilla de fondo, similar a un sumidero combinado. El dimensionamiento de este tipo de captación se realiza analizando cada captación de manera

independiente, es decir, la descarga total será la suma del caudal captado por el vertedero lateral y la rejilla, del mismo modo, se debe tener en cuenta la localización del sumidero, bien sea en pendiente o en un punto bajo (Leidy Franco, 2015, p. 137).

Para conformar la rejilla se utiliza el elemento A 128 que se muestra en la Figura 18, se pueden utilizar varios módulos para conformar la rejilla de la longitud de la captación, cada módulo tiene un área en planta de 0.40 x 0.40 m<sup>2</sup> y también está disponible en medio módulo de 0.40 x 0.20 m<sup>2</sup>.

Figura 18. Elemento A 128 (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007, p. 56)



La longitud necesaria para captar la totalidad del flujo de escorrentía sobre la vía, en un sumidero de ventana o lateral, está dada por la siguiente expresión, basada en el flujo normal analizado con la expresión de Manning Strikler (Drainage & District, 2016, pp. 7-17-18):

$$L_T = 0.817Q^{0.42}S_L^{0.3} \left( \frac{1}{nS_x} \right)^{0.6} \quad (6)$$

$$L_T = 0.817Q^{0.42}S_L^{0.3} \left( \frac{1}{nS_e} \right)^{0.6} \quad (7)$$

Donde:

$L_T$ : Longitud necesaria para captar el 100 % de escorrentía (m).

$Q$ : Caudal de escorrentía (m<sup>3</sup>/s)

$S_L$ : Pendiente longitudinal (m/m)

$S_x$ : Pendiente Transversal de la vía (bombeo) (m/m)

$n$ : Coeficiente de Manning.

$S_e$ : Pendiente equivalente  $S_e = S_x + \frac{a+a_{local}}{w} E_0$

$a$ : Depresión en la entrada de la captación lateral (m)

$a_{local}$ : Otras depresiones además de  $a$  (m).

$w$ : Ancho superficial sobre cuneta de aproximación (m).

$E_0$ : Relación entre el caudal que viaja sobre la cuneta  $Q_w$  y el caudal total  $Q$ .

Utilizando las expresiones (6) y (7) se encuentra una longitud de ventana de 4.82 y 2.03 m, para capturar la totalidad el caudal, sin embargo, la normatividad reglamente una longitud de 0.87 m (EAAB, 2009) teniendo en cuenta un factor de obstrucción de 0.10. Se elige entonces un ancho lateral de 1 m. teniendo en cuenta la eficiencia de la captación lateral el caudal que no sea evacuado por una unidad se trasportará hacia aguas abajo hasta ser captado por la siguiente unidad de captación.

El dimensionamiento del vertedero de excesos se realiza teniendo en cuenta el caudal máximo que transitará por la cuneta y las condiciones de conexión al alcantarillado pluvial. El vertedero seleccionado es un vertedero tipo *morning glory* con rejilla y una carga máxima de 0.05 m. la carga sobre el vertedero resulta de la lámina máxima que permite almacenar la estructura de biorretención (numeral 1.2.4.1).

$$Q = C_0 \pi R_s H_o^{3/2} \quad (8)$$

Donde:

$Q$ : Caudal de diseño ( $m^3/s$ )

$C_0$ : Coeficiente de descarga

$R_s$ : Radio del vertedero (m)

$H_0$ : Energía total sobre la cresta del vertedero (m)

La entrega al sistema tradicional de alcantarillado se realiza siguiendo las recomendaciones de la norma NS-085, y NS-047 donde se establece que el diámetro mínimo de conexión debe ser de 12" (315 mm di=284 mm) y se debe entregar con una pendiente no menor al 2% y a una profundidad máxima de 1.20 m. La ecuación (8) describe la descarga del vertedero de excesos, suponiendo que el vertedero se conformará con una tubería de PVC y que tendrá una arista viva se puede esperar que el coeficiente de descarga tenga un valor pequeño muy cercano al de un vertedero de pared delgada, solo para verificación se supone un coeficiente de 2.0 que es el recomendado para un vertedero *morning glory* con un perfil tipo Creager. Con estas condiciones y utilizando la ecuación (8) se obtiene un caudal de 10.57 Lps para una lámina de 52 mm, como se resume en la Tabla 11, es adecuada para el espacio disponible de almacenamiento sobre la estructura.

Tabla 11. Vertedero de Excesos

Vertedero de excesos		
Q Diseño:	0.01034	m <sup>3</sup> /s
Q:	0.01058	m <sup>3</sup> /s
Co:	2	
Rs:	0.142	m
Ho:	0.052	m

Otro elemento a tener en cuenta es el pequeño sedimentador para atrapar arenas y posibles basuras que viajen por el drenaje de la vía, se dimensiona teniendo en cuenta la teoría de sedimentación propuesta por Stokes. En la Tabla 12 se puede ver el dimensionamiento propuesto dentro de los límites de espacio que se establece para un sumidero tradicional, se puede observar que se logra retener partículas superiores a 0.20 mm, que corresponden a una arena gruesa. A pesar de tener un tiempo de retención corto y una carga superficial muy alta para el caudal de diseño, se mantienen estas dimensiones teniendo en cuenta que el mantenimiento es bueno.

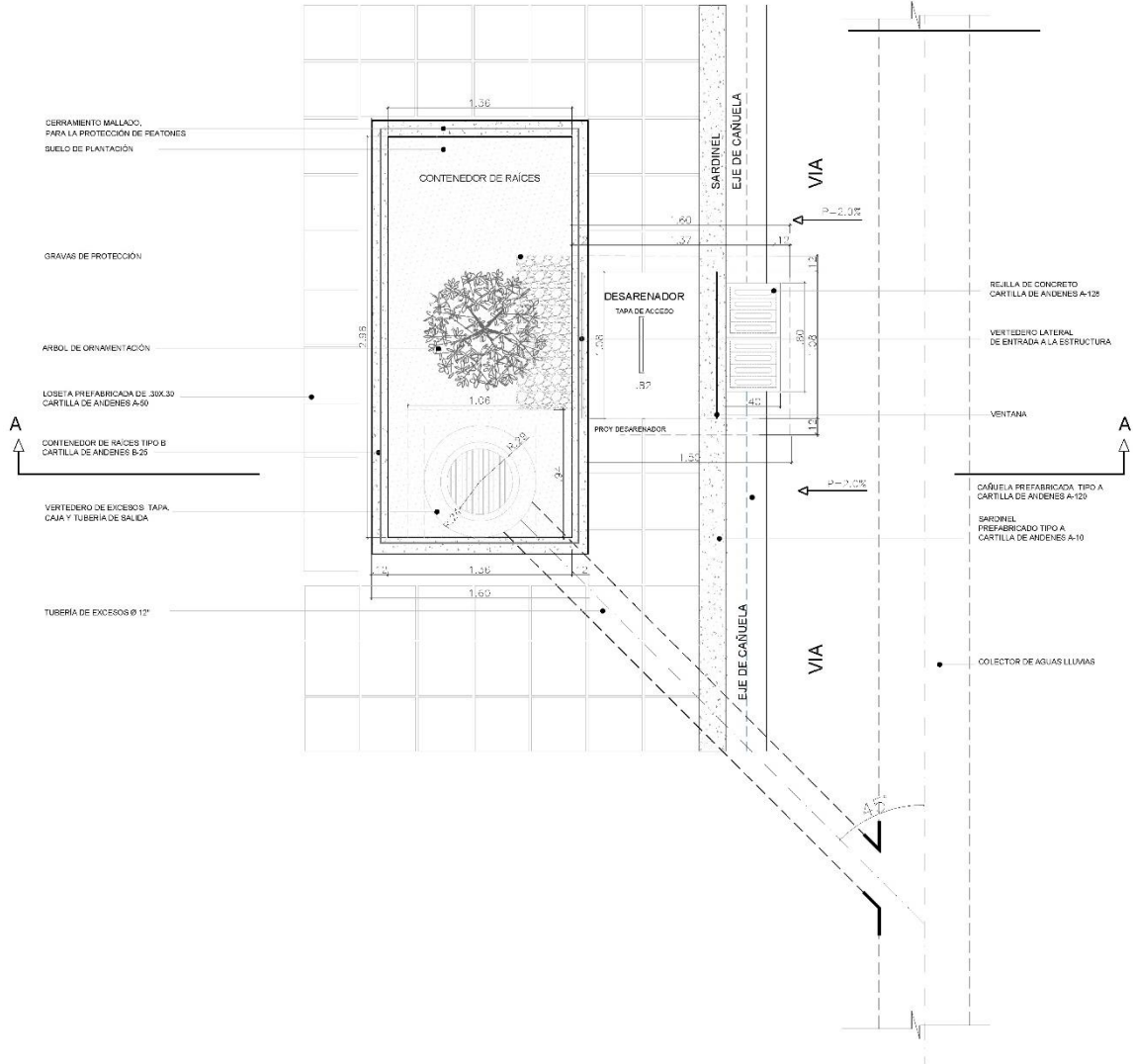
Tabla 12. Dimensionamiento del Sedimentador

Dimensionamiento de Sedimentador					
Qd(m <sup>3</sup> /s):	0.01034	H(m):	0.80	% Remoción	87.50
d(mm):	0.20	t =H/Vs (seg)	27.93	V(m/s):	0.013
n(m <sup>2</sup> /s):	1.141E-06	Vs/Vc=q/t:	2.75	20Vs ? (m/s): Ok	0.573
r(Kg/m <sup>3</sup> ):	997.8	q(Hr):	0.02	f:	0.009
L/B (L:1):	1	Vo(m3): Mal	0.79	v*(m/s):	0.000
Ni(m.s.n.m):	-	As(m <sup>2</sup> ):	0.99	t <sub>0</sub> (Pa):	0.000
dr:	2.5	B(m):	1.00	Re*:	0.077
V <sub>s</sub> aprox(cm/s):	5.2	L(m):	1.00	t(Pa):	0.600
Re:	0.000	qs(m <sup>3</sup> /m <sup>2</sup> -día):			
V <sub>s</sub> (m/s):	0.029	Mal	900.05	Va(m/s): Ok	1.239
V <sub>s</sub> (cm/s):	2.865				

### 1.2.4.7. Detalles constructivos

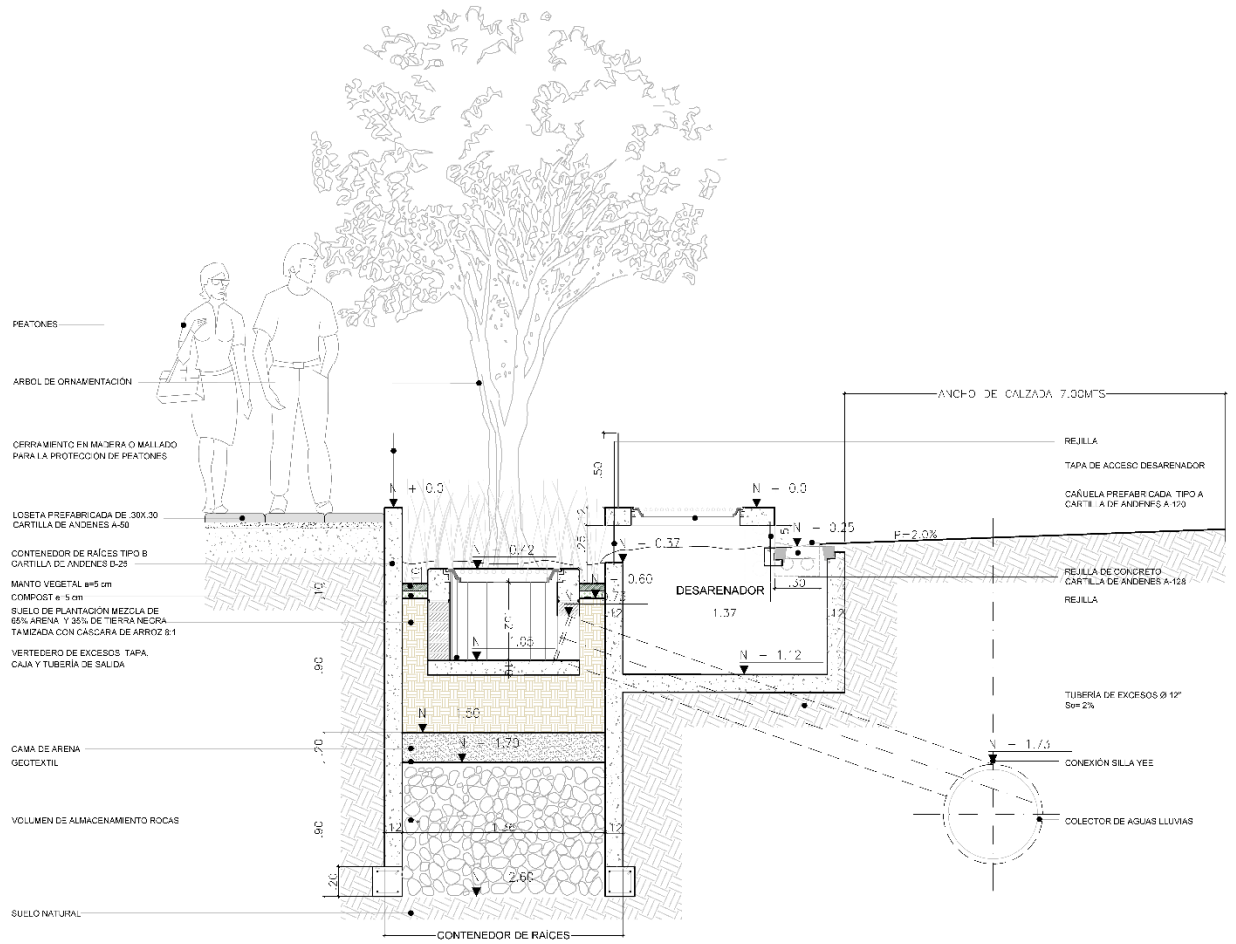
Los detalles y planos se pueden consultar en los anexos. En la Figura 19 y en la Figura 20 se presentan los esquemas generales de la estructura propuesta en cuanto a dimensione se refiere.

Figura 19. Esquema General en Planta de la Estructura Propuesta



Nota: los detalles que se presenta son ilustrativos y debe verificarse su estabilidad estructural, así mismo, evaluarse las dimensiones de los elementos estructurales.

Figura 20. Esquema General en Corte de la Estructura Propuesta



## 2. ANTECEDENTES GENERALES

La hidrología de las ciudades está en un continuo cambio, con el ritmo de expansión actual y las nuevas tecnologías constructivas cada vez son menos las áreas permeables en las zonas urbanas; el principal impacto de la urbanización se refiere a la impermeabilización de los suelos nativos (AGRA, 2001). Las nuevas áreas impermeables alteran el ciclo hidrológico a gran escala, estos cambios derivan en un aumento del pico de escorrentía superficial generando problemas de inundación, sedimentación, calidad del agua, entre otros. (Maryland Department of the Environment, 2009a).

Las lluvias de gran parte del territorio Colombiano, se encuentran influenciadas por la zona de confluencia intertropical que la alcanza varias veces al año, afectando directamente a las ciudades en un incremento de lluvias torrenciales en los dos periodos de invierno visiblemente marcados: primer y tercer trimestre anual (Esperanza et al., 2000). Las inundaciones que se presentan en el territorio Colombiano provocan grandes pérdidas materiales y de vidas humanas, solamente en el sector norte de (Torca) Bogotá precipitan en promedio 1197 mm al año (IDEAM - Instituto de Hidrología, 2004), es común ver las calles inundadas en tiempos de tormenta. Los picos de escorrentía son lo suficientemente altos como para colmar la capacidad del sistema de alcantarillado de aguas lluvias.

En la actualidad, las estructuras de drenaje sostenible se están implementando como una ayuda a la reducción de los tiempos de concentración de la escorrentía superficial, mejoramiento de calidad del agua in situ y la conservación de la biodiversidad. Las estructuras BMP son utilizadas, entre otras funciones, para disminuir el pico de escorrentía superficial tratando el agua en el lugar donde precipita, ya sea almacenando o infiltrando la escorrentía que proviene de las áreas impermeables de las zonas urbanizadas.

Los Sistemas Urbanos de Drenaje Sostenible (SUDS) han sido estudiados desde hace varias décadas en países como Francia, Suiza, Australia, Holanda, Estados Unidos, entre otros. Sin embargo, en Colombia sólo se han considerado a partir del año 2011. En algunas urbanizaciones de Bogotá se han implementado estructuras denominadas canales vegetales para la amortiguación de los hidrogramas de lluvia locales (EAAB, 2009; Secretaría Distrital de Bogotá, 2011).

La EAAB<sup>1</sup>, en conjunto con la secretaría distrital de ambiente, prevén la implementación de estructuras de captación BMP en todas las zonas de la capital Colombiana (Secretaría Distrital de Bogotá, 2011), el principal uso de estas estructuras es el de controlar el pico de escorrentía con base en el tiempo de retención dado para cada captación, minimizando los daños que puede ocasionar la alta concentración de caudales en las zonas urbanas (EAAB, 2009).

El paisaje urbanístico de la ciudad de Bogotá contempla el espacio público como un componente esencial en el desarrollo visual del entorno metropolitano, desde la esquina tipo alameda hasta el separador duro, los andenes ocupan un gran porcentaje del área impermeable en el sistema de drenaje de aguas lluvias de la ciudad. Los anchos de estas estructuras están comprendidos entre 1.5 m y 15.40 m, en los cuales se puede concentrar fuertemente la escorrentía superficial en tiempos de lluvia, aumentando los caudales captados (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007).

Hasta ahora, en Colombia, los sistemas de Biorretención han sido situados en los límites de las vías en forma superficial, sin aprovechar las áreas de andenes y zonas duras. Realmente en Colombia no se han implementado los sistemas BMP a gran escala, sin embargo, se prevé que en el diseño moderno de redes urbanísticas se incluyan (Secretaría Distrital de Bogotá, 2011).

---

<sup>1</sup> Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.



El sub-suelo es un medio que puede almacenar una cantidad considerable de agua, permite la formación de acuíferos que son utilizados para abastecer ciudades con deficiencia en el recurso hídrico. La hidrología depende fundamentalmente del ciclo del agua, que a su vez se desarrolla con los procesos de evaporación y transpiración en suelos y plantas respectivamente. Comprender el comportamiento del agua en el suelo es fundamental para enfrentar el problema del drenaje urbano.

Diversos modelos matemáticos fueron desarrollados para deducir el comportamiento del movimiento del agua en el suelo, un estudio sobresaliente es el desarrollado por E. Hincapié en el cual se desenvuelve un algoritmo que permitió la modelación hidrodinámica del agua en suelos volcánicos de ladera (Hincapié Gómez, 2011), El uso de estructuras sostenibles ha despertado interés en la comprensión del flujo a través de los distintos componentes de suelo que hacen parte de estos elementos.

Los procesos dinámicos del agua se desenvuelven principalmente en la zona no saturada, el estudio de esta zona, para el movimiento del agua y transporte de solutos se centra en la solución de las ecuaciones de Richards y la ecuación de advección - dispersión. El desarrollo de software es la herramienta más utilizada actualmente para resolver el problema de modelación matemática.

El programa Hydrus-1D incorpora un modelo unidimensional que describe el movimiento del agua en la zona no saturada del suelo, basado en la solución a la ecuación de Richards, puede ser utilizado entre otras cosas, para describir el flujo del agua a través del suelo y el transporte de solutos (J. Šimůnek, M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, 2013; Saifadeen & Gladnyeva, n.d.). Para resolver las ecuaciones de Richards es necesario conocer la curva de retención característica del suelo que depende de las propiedades hidrodinámicas de este, así como de sus características físicas (Hincapié Gómez, 2011). Para describir el comportamiento del flujo en el suelo, es necesario conocer la relación que existe entre la conductividad hidráulica, la humedad residual, la humedad de saturación con el potencial de presión en el suelo (Pujolràs, 2006).

Con el objeto de determinar dichas propiedades se pueden utilizar métodos de medición in-situ o de laboratorio. Los métodos utilizados en el laboratorio, como es la columna de suelo, son más precisos ya que se pueden definir claramente las condiciones de frontera, lo cual permite medir de manera más aproximada las variables que intervienen en el comportamiento del flujo del agua en el suelo (Hincapié Gómez, 2011; Salas García, 2012).

El modelo Hydrus-1D es considerado uno de los motores más efectivos al momento de realizar modelaciones de flujo en el suelo, en cuanto a la flexibilidad y algoritmo de cálculo (Salas García, 2012), este modelo permite calibrar, partiendo de unos datos medidos o conocidos, una columna de suelo para determinar los parámetros que mejor se ajusten a un comportamiento de la curva de retención característica; esta metodología se conoce como modelación inversa (J. Šimůnek, Šejna, & Genuchten, 2012).

El proceso consiste en construir una función objetivo que servirá para estimar la correlación existente entre los datos medidos y los datos simulados, relacionada con los parámetros aplicables y las condiciones de frontera para el caso de estudio. Los parámetros más precisos serán aquellos que correspondan al mínimo de dicha función. La calibración del modelo se puede lograr mediante métodos automatizados para la estimación de parámetros, también puede utilizarse la técnica de ensayo y error. (J. Šimůnek et al., 2012).

Existen, en función de los parámetros conocidos, varias maneras para realizar la calibración inversa, uno de los más utilizados es realizar la calibración matemática del modelo de Hydrus en función de dos parámetros fundamentales, la tensión capilar en los granos de suelo y el contenido volumétrico de agua del suelo. Estas variables permiten asociar el modelo matemático de Hydrus con las características hidrodinámicas del suelo en estudio (J. Šimůnek, M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, 2013), (Jiří Šimůnek, Angulo-Jaramillo, Schaap, Vandervaere, & van Genuchten, 1998).

### 3. CARACTERIZACIÓN DE LOS SUELOS

#### 3.1. Descripción de suelos

Los suelos que se usan en el experimento de columna de suelo son los elegidos de acuerdo a las recomendaciones descritas en el capítulo 1.2.4.4 y consiste en dos suelos principalmente:

- Arena para la mezcla de concretos ASTM C-33.
- Mezcla de tierra negra, cascarilla de arroz quemada y arena.

La arena utilizada es la que comúnmente se utiliza en mezcla de concretos como agregado fino, teniendo en cuenta la clasificación ASTM para arenas, se utiliza todo el material que pasa por el Tamiz No. 4. Por otra parte, la tierra negra es comercializada por diversos fabricantes que la procesan dependiendo del uso que se le quiera dar, en este caso, se usa tierra negra que incluya cascarilla de arroz de la marca Jarditec que viene empacada, tamizada, seleccionada y libre de raíces y lombrices.

#### 3.2. Granulometría

Los ensayos de granulometría se realizan en el laboratorio de Geotecnia de la Escuela Colombiana de Ingeniería siguiendo la normatividad vigente. Se realiza el ensayo para los dos diseños de suelo que componen la columna, estos son: suelo de plantación y el suelo que compone la cama de arena. En la Tabla 13 se pueden apreciar las variables consideradas, la normatividad aplicada y los resultados del ensayo de granulometría. Particularmente, se muestra el diámetro característico  $d_{50}$ . En la Figura 21 y Figura 22 se muestran las curvas granulométricas para cada tipo de suelo.

Tabla 13. Ensayo de Granulometría para la Arena (cama de arena)

Norma INV - E 213 - 13

#### TAMAÑO DE PARTÍCULAS Y GRANULOMETRÍA (Arena)

Fecha 2015.07.15

MUESTRA	1
Peso Sucio y Seco (gr)	1207.7
Peso Retenido Seco (gr)	1153.20
Pasa_200:	54.50

% Pasa	d <sub>50</sub>
Tamaño (mm)	0.556

Curva Granulométrica para la Arena								
Tamiz	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Corregido	% Acumulado	% Pasa	Tamiz (mm)	Loc. Intervalo	Tamaño (mm)
3	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	76.12		
2-1/2"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	38.1		
2"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	50.8		
1-1/2"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	38.1		
1"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	25.4		
3/4"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	19.05		
1/2"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	12.7		

Curva Granulométrica para la Arena								
Tamiz	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Corregido	% Acumulado	% Pasa	Tamiz (mm)	Loc. Intervalo	Tamaño (mm)
3/8"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	9.525	1	0.556
1/4"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	6.35		
No.4	44.7	3.88%	3.70%	3.70%	96.30	4.75		
No.8	236.9	20.56%	19.62%	23.32%	76.68	2.38		
No.10	37.7	3.27%	3.12%	26.44%	73.56	2		
No.16	135.9	11.80%	11.25%	37.69%	62.31	1.19		
No.30	129.3	11.22%	10.71%	48.40%	51.60	0.6		
No.40	76.4	6.63%	6.33%	54.72%	45.28	0.425		
No.50	102.8	8.92%	8.51%	63.24%	36.76	0.3		
No.60	101.1	8.78%	8.37%	71.61%	28.39	0.25		
No.80	122.2	10.61%	10.12%	81.73%	18.27	0.18		
No.100	50.6	4.39%	4.19%	85.92%	14.08	0.15		
No.200	102.6	8.91%	8.50%	94.41%	5.59	0.075		
P_200-FONDO	11.8	1.02%	5.49%	99.90%	0			
Total	1152.00	100.000%						

Figura 21. Curva Granulométrica para la Arena

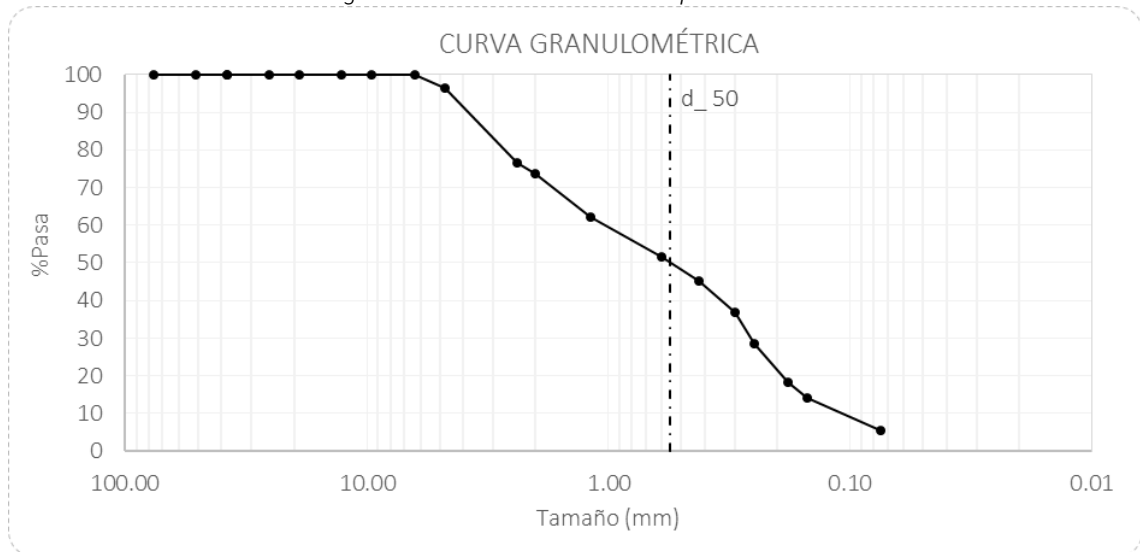


Tabla 14. Ensayo de Granulometría para la Mezcla Arena-Tierra (Suelo de Plantación)  
 Norma INV - E 213 - 13

TAMAÑO DE PARTÍCULAS Y GRANULOMETRÍA  
 (Suelo de Plantación)

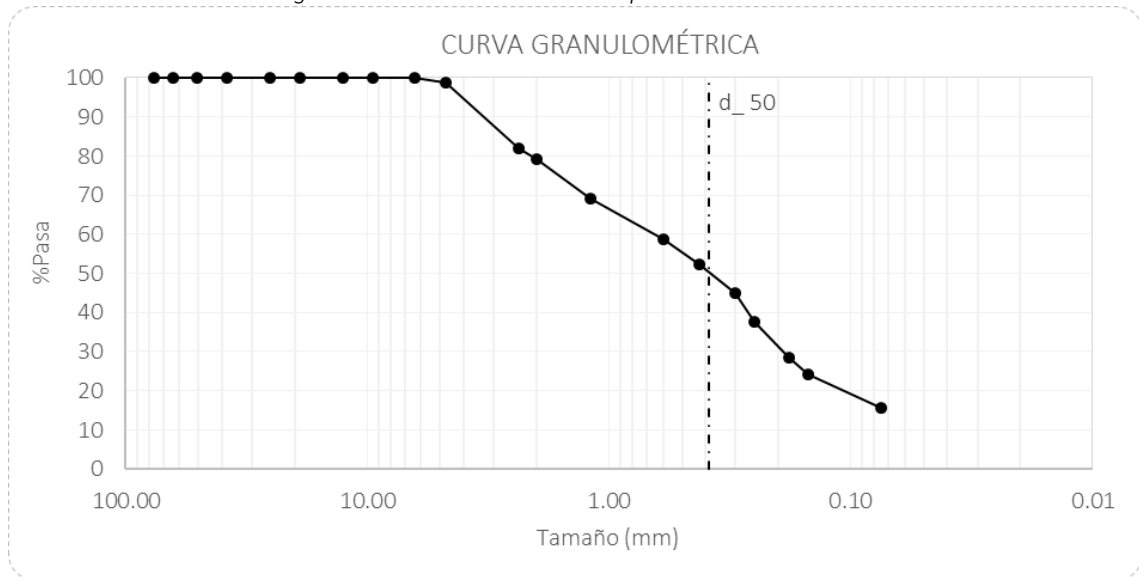
Fecha 2015.07.15

MUESTRA	1
Peso Sucio y Seco (gr)	1204.2
Peso Retenido Seco (gr)	1036.30
Pasa_200:	167.90

% Pasa	d_50
Tamaño (mm)	0.387

Curva Granulométrica								
Tamiz	Peso Retenido	% Retenido	% Retenido Corregido	% Acumulado	% Pasa	Tamiz (mm)	Loc. Intervalo	Tamaño (mm)
3	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	76.12		
2-1/2"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	63.5		
2"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	50.8		
1-1/2"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	38.1		
1"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	25.4		
3/4"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	19.05		
1/2"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	12.7		
3/8"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	9.525		
1/4"	0	0.00%	0.00%	0.00%	100.00	6.35		
No.4	13.7	1.33%	1.14%	1.14%	98.86	4.75		
No.8	203.5	19.73%	16.90%	18.04%	81.96	2.38		
No.10	32.7	3.17%	2.72%	20.75%	79.25	2		
No.16	122	11.83%	10.13%	30.88%	69.12	1.19		
No.30	125	12.12%	10.38%	41.26%	58.74	0.6		
No.40	77.7	7.53%	6.45%	47.72%	52.28	0.425	1	0.387
No.50	90	8.73%	7.47%	55.19%	44.81	0.3		
No.60	86.4	8.38%	7.17%	62.37%	37.63	0.25		
No.80	111.4	10.80%	9.25%	71.62%	28.38	0.18		
No.100	50	4.85%	4.15%	75.77%	24.23	0.15		
No.200	102.4	9.93%	8.50%	84.27%	15.73	0.075		
P_200-FONDO	16.5	1.60%	1.37%	85.64%	14.36	0.000		
Total	1031.3	100.000%						

Figura 22. Curva Granulométrica para el Suelo de Plantación



### 3.3. Densidades

A continuación, se mencionan las definiciones de las diferentes densidades y coeficientes precisados por la normatividad colombiana (INVIAS, 2013, pp. E222-1).

- Condición saturada y superficialmente seca (SSS): condición en la cual los poros permeables de las partículas del agregado están llenos de agua en la cantidad que se logra al sumergirlas en agua durante un tiempo especificado, pero sin que exista agua libre en la superficie de las partículas.
- Adsorción: incremento de masa de un agregado, debido a la penetración de agua dentro de los poros de las partículas durante un periodo especificado, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas. La adsorción se expresa como un porcentaje de la masa seca del agregado.
- Densidad en condición seca al horno (SH): masa por unidad de volumen de las partículas de agregado secas al horno, incluyendo el volumen de poros permeables e impermeables de las partículas, pero no los vacíos entre ellas.
- Densidad en condición saturada y superficialmente seca (SSS): masa por unidad de volumen de las partículas del agregado saturadas y superficialmente secas, incluyendo el volumen de los poros permeables e impermeables de las partículas y el agua que llena los poros permeable, pero no los vacíos entre las partículas.
- Densidad aparente: masa por unidad de volumen de la porción impermeable de las partículas del agregado.
- Densidad relativa (gravedad específica): relación entre la densidad de un material y la densidad del agua a una temperatura indicada. Su valor es adimensional.
- Densidad relativa (gravedad específica) en condición seca al horno (SH): relación entre la densidad del agregado en condición seca al horno (SH) y la densidad del agua a una temperatura indicada.

- Densidad relativa aparente (gravedad específica aparente): relación entre la densidad aparente del agregado y la densidad del agua a una temperatura indicada.
- Densidad *bulk* de un agregado: masa de un volumen unitario de un agregado total, el cual incluye el volumen de las partículas individuales y el volumen de vacíos entre ellas.

Tabla 15. Ensayo para determinar las densidades de la Arena

Norma INV - E 217 - 13

DETERMINACIÓN DE DENSIDADES DEL SUELO  
(Arena)

Fecha 2015.07.15

Peso Platon:	104.6 gr
Peso Probeta:	134. gr
Pe	937.5 gr

Pe Seco+Platon:	598.8 gr
H <sub>2</sub> O+Pro:	632.3 gr
Peso Muestra sss:	500. gr

DEFINICIONES DE LA NORMA	
A: Masa al aire de la muestra seca al horno	494.2 g
B: Masa del picnómetro aforado lleno de agua	632.3 g
C: Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua	937.5 g
S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca SSS	500 g

Densidad Relativa	
Densidad Relativa (Gravedad Específica) secada al horno	2.54 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Relativa (Gravedad Específica) en condición SSS	2.57 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Relativa Aparente (Gravedad Específica Aparente)	2.61 g/cm <sup>3</sup>

Densidad	
Densidad en Condición Seca al Horno	2530.62 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad en condición SSS	2560.32 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad Aparente	2608.28 Kg/m <sup>3</sup>

Absorción (%)	1.17 %
---------------	--------

Tabla 16. Ensayo para determinar la Densidad Bulk de la Arena

Norma INV - E 217 - 13

DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO DEL SUELO O DENSIDAD *BULK*  
(Arena)

PESO UNITARIO SUELTO	
Densidad Bulk Kg/m <sup>3</sup>	1660.0

PESO UNITARIO COMPACTADO	
Densidad Bulk Kg/m <sup>3</sup>	1725.926

1. Peso Material Suelto (g)	5387.00
2. Peso Material Suelto (g)	5362.00
3. Peso Material Suelto (g)	5345.00
Peso Probeta (g)	3796.00
Volumen Probeta (cm <sup>3</sup> )	945.00

1. Peso Material Apisonado	5427.00
2. Peso Material Apisonado	5427.00
3. Peso Material Apisonado	5427.00
Peso Probeta (g)	3796.00
Volumen Probeta (cm <sup>3</sup> )	945.00

Tabla 17. Ensayo para Determinar las Densidades del Suelo de Plantación

Norma INV - E 217 - 13

DETERMINACIÓN DE DENSIDADES DEL SUELO  
(Suelo de Plantación)

Fecha 2015.07.15

Peso Platón:	152.2 gr
Peso Probeta:	134. gr
Pe	
Prob+Msss:	920. gr

Pe Seco+Platon:	634.3 gr
H <sub>2</sub> O+Pro:	632.3 gr
Peso Muestra sss:	500. gr

DEFINICIONES DE LA NORMA	
A: Masa al aire de la muestra seca al horno	482.1 g
B: Masa del picnómetro aforado lleno de agua	632.3 g
C: Masa total del picnómetro aforado con la muestra y lleno de agua	920 g
S: Masa de la muestra saturada y superficialmente seca SSS	500 g

Densidad Relativa	
Densidad Relativa (Gravedad Específica) secada al horno	2.27 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Relativa (Gravedad Específica) en condición SSS	2.36 g/cm <sup>3</sup>
Densidad Relativa Aparente (Gravedad Específica Aparente)	2.48 g/cm <sup>3</sup>

Densidad	
Densidad en Condición Seca al Horno (Kg/m <sup>3</sup> )	2265.17 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad en condición SSS (Kg/m <sup>3</sup> )	2349.27 Kg/m <sup>3</sup>
Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> )	2473.74 Kg/m <sup>3</sup>

Absorción (%)	3.71 %
---------------	--------

Tabla 18. Ensayo para determinar la Densidad Bulk del suelo de Plantación

Norma INV - E 217 - 13

DETERMINACIÓN DEL PESO UNITARIO DEL SUELO O DENSIDAD BULK  
(Suelo de Plantación)

PESO UNITARIO SUELTO	
Densidad Bulk Kg/m <sup>3</sup>	1419.4

PESO UNITARIO COMPACTADO	
Densidad Bulk Kg/m <sup>3</sup>	1444.8

1. Peso Material Suelto (g)	5131.00
2. Peso Material Suelto (g)	5138.00
3. Peso Material Suelto (g)	5143.00
Peso Probeta (g)	3796.00
Volumen Probeta (cm <sup>3</sup> )	945.00

1. Peso Material Apisonado	5183.00
2. Peso Material Apisonado	5178.00
3. Peso Material Apisonado	5123.00
Peso Probeta (g)	3796.00
Volumen Probeta (cm <sup>3</sup> )	945.00

### 3.4. Porosidad y $\theta_s$

La porosidad es una propiedad de los suelos que determina en gran parte la capacidad de este para transitar un flujo a través de su estructura, del mismo modo que la forma de empaquetamiento de las partículas (Fetter, 1994). La porosidad se determina como función de la densidad aparente y de la densidad real de un suelo, la porosidad en porcentaje se puede calcular con la siguiente expresión (Fetter, 1994):

$$n = 100 \left[ 1 - \frac{\rho_b}{\rho_m} \right] \quad (9)$$

Dónde:

$\rho_b$ : Densidad aparente de la muestra (densidad seca o densidad Bulk)  $\frac{M}{L^3}$ .

$\rho_m$ : Densidad de las partículas  $\frac{M}{L^3}$ .

$n$ : Porosidad expresada en porcentaje.

Teniendo en cuenta que  $\rho_b = \frac{M_{sólidos}}{V_{total}}$  y que  $\rho_m = \frac{M_{sólidos}}{V_{sólidos}}$  La expresión (9) también se puede escribir de la siguiente manera:

$$n = 100 \left[ 1 - \frac{V_{sólidos}}{V_{total}} \right] \quad (10)$$

La porosidad muestra el porcentaje de volumen de vacíos en el suelo o espacio poroso, incluye los micro poros y los macro poros de las partículas. Puede interpretarse que teóricamente el valor de la porosidad corresponde al valor del contenido volumétrico de agua a saturación  $\theta_s$ , sin embargo, en la práctica el valor de  $\theta_s$  es un tanto menor a la porosidad debido al aire atrapado y/o disuelto entre las partículas de suelo (Pujolràs, 2006, p. 8). En la Tabla 19 se muestra el cálculo de la porosidad para los suelos que componen la estructura propuesta.

Tabla 19. Cálculo de la Porosidad de los Suelos

Porosidad Arena			Porosidad del Suelo de Plantación		
Densidad Bulk Kg/m <sup>3</sup>	1725.9		Densidad Bulk Kg/m <sup>3</sup>	1444.8	
Densidad Aparente Kg/m <sup>3</sup>	2608.28		Densidad Aparente (Kg/m <sup>3</sup> ) Kg/m <sup>3</sup>	2473.74	
$\eta = \theta_s$	0.36	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>	$\eta = \theta_s$	0.42	cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup>

### 3.5. Mezcla de suelos

Se requiere una mezcla de arena y tierra negra que será utilizada en la capa de suelo de plantación, en una proporción de 65% de arena y 35% de tierra negra en volumen. Para poder realizar una adecuada distribución volumétrica de estos materiales, es necesario conocer la densidad aparente o densidad seca de cada material con el fin de realizar una relación de fase en el suelo para lograr la mezcla, en la Tabla 20 se muestran las densidades secas para cada tipo de suelo que se usará en mezcla para componer las capas de la columna de suelo.

Tabla 20. Cálculo de la Densidad Seca/bulk Para el diseño de la Mezcla del suelo de Plantación

Densidad Seca Apisonada:		
Arena:	1670	Kg/m <sup>3</sup>
Tierra:	738	Kg/m <sup>3</sup>



Densidad seca Tierra Negra:		
Peso recipiente:	9.5	g
Peso recipiente +suelo seco:	83.3	g
Volumen Recipiente:	100	ml
Peso del suelo:	73.8	gr

Densidad seca Arena:		
Peso recipiente:	9.5	g
Peso recipiente +suelo seco:	176.5	g
Volumen Recipiente:	100	ml
Peso del suelo:	167	gr

Densidad Agua:		
Peso recipiente:	9.5	g
Peso recipiente + Agua:	109.3	g
Volumen Recipiente:	100	ml
Peso del agua:	99.8	gr

La primera definición que se debe realizar es la cantidad total de suelo que se va a usar en la columna, este volumen de suelo es la base de partida para el proceso de mezclado, también se tiene en cuenta el desperdicio y adicionalmente, la cantidad necesaria para realizar los ensayos de caracterización de estos materiales, en la Tabla 21 se muestra la cantidad de suelos requeridos, se calculan los volúmenes con base en el tubo que sirve de soporte para la columna de suelo. Para la mezcla de suelo de plantación se debe tener presente la humedad natural a la que se encuentra el suelo en el volumen total de mezcla, y su densidad aparente, en la Tabla 21 se muestra el cálculo de las cantidades necesarias para lograr una mezcla de suelo de 65% de arena y 35% de tierra negra en volumen.

Tabla 21. Cálculo de Cantidades de Suelo

CÁLCULO DE CANTIDADES DE SUELO EN LA COLUMNA EXPERIMENTAL								
Geometría			% En Volumen		Volumen		Total	
Diámetro Interno (m)	Altura (m)		Arena (%)	Tierra (%)	Arena (m <sup>3</sup> )	Tierra (m <sup>3</sup> )	Arena (Kg.)	Tierra (Kg.)
0.227	0.35		100.00%	0.00%	0.0142	0	23.66	0
0.227	1.64		65.00%	35.00%	0.0430	0.0231646	71.84	17.10
					Vt:	0.0662	95.50	17.10
					Vi:	0.0000		

Tabla 22. Cálculo de Cantidades Para la Mezcla del Suelo de Plantación

Humedad Inicial del suelo: Arena		
Humedad w:	0.01396	g/g
Recipiente:	518	g
Suelo+agua+Recipiente:	975.7	g
Suelo seco +Recipiente:	969.4	g

Humedad Inicial del suelo: Tierra Negra		
Humedad w:	0.66582	g/g
Recipiente:	114	g
Suelo+agua+Recipiente:	1098.5	g
Suelo seco +Recipiente:	705	g

Calculo de Cantidades Arena		
$\omega$ :	1.40%	%
Vt:	0.043020	m <sup>3</sup>
$\rho_b$ :	1670	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$ :	1000	Kg/m <sup>3</sup>
$\theta$ :	0.023	m/m.
Vw:	0.001003	m <sup>3</sup>
Mw:	1.003	Kg
Ms:	71.843	Kg
Mr:	72.846	Kg

Calculo de Cantidades Tierra		
$\omega$ :	66.58%	%
Vt:	0.0232	m <sup>3</sup>
$\rho_b$ :	738	Kg/m <sup>3</sup>
$\rho_w$ :	1000	Kg/m <sup>3</sup>
$\theta$ :	0.491	m/m.
Vw:	0.011383	m <sup>3</sup>
Mw:	11.383	Kg
Ms:	17.095	Kg
Mr:	28.478	Kg

Una vez obtenidas las cantidades necesarias se realiza la mezcla mecánica de los suelos, este proceso de mezclado es muy importante ya que de ello depende la homogeneidad del suelo de plantación, se agregan cantidades pequeñas de cada suelo en cantidades iguales y se mezcla manualmente, posteriormente se deja mezclar mecánicamente aproximadamente durante 3 horas. El proceso se ilustra en la Figura 23.

Figura 23. Proceso de Mezclado del Suelo



### 3.6. Clasificación USDA de los Suelos

A partir de la curva granulométrica para cada suelo, se determinan los porcentajes de arenas, limos y arcillas. Los límites de clasificación, en función del tamaño del grano según el USDA se presentan en la Tabla 23:

Tabla 23. Límites de Clasificación para Arenas, Limos y Arcillas USDA

Clasificación USDA	límite (mm)	
Arena Muy Gruesa	2	1
Arena Gruesa	1	0.5
Arena Mediana	0.5	0.25
Arena Fina	0.25	0.1
Arena Muy Fina	0.1	0.05
Limo	0.05	0.002
Arcilla	0.002	-

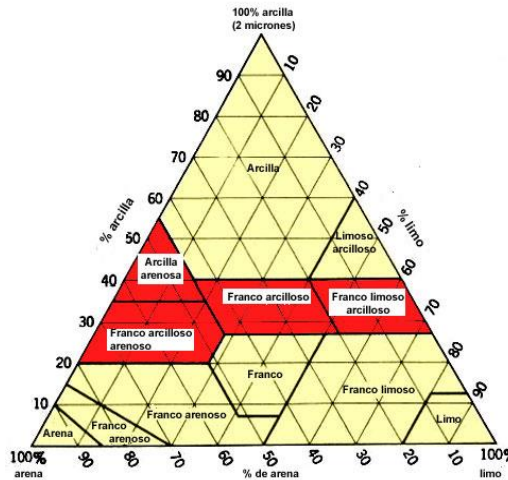
De acuerdo a la tabla anterior, las arenas se componen de partículas cuyo diámetro medio se encuentra entre 2 y 0.05 mm, los limos entre 0.05 y 0.002 mm. las arcillas se caracterizan por partículas menores a 0.002 mm. sobre la curva granulométrica de la Figura 21 se realiza una interpolación lineal para determinar dichos porcentajes, se debe tener en cuenta que el porcentaje se determina con respecto al total de la muestra que contiene partículas desde 2 mm y hasta 0 mm. el mismo procedimiento se realiza con la curva para el suelo de plantación que se muestra en la Figura 22. Los porcentajes de arcilla, limos y arenas para cada suelo se muestran en la Tabla 24.

Tabla 24. Porcentajes de Arena, Limo y Arcilla para la Clasificación USDA

Porcentajes según USDA		Porcentajes según USDA	
Arena		Suelo de Plantación	
Arenas	94.76	Arenas	85.58
Limo	5.1	Limo	13.59
Arcilla	0.13	Arcilla	0.82

La clasificación de textura se realiza con ayuda del triángulo de texturas del USDA y de la herramienta de clasificación disponible en la Web del USDA. El resultado de la clasificación para ambos suelos es *Sand*.

Figura 24. Triángulo de Texturas del USDA



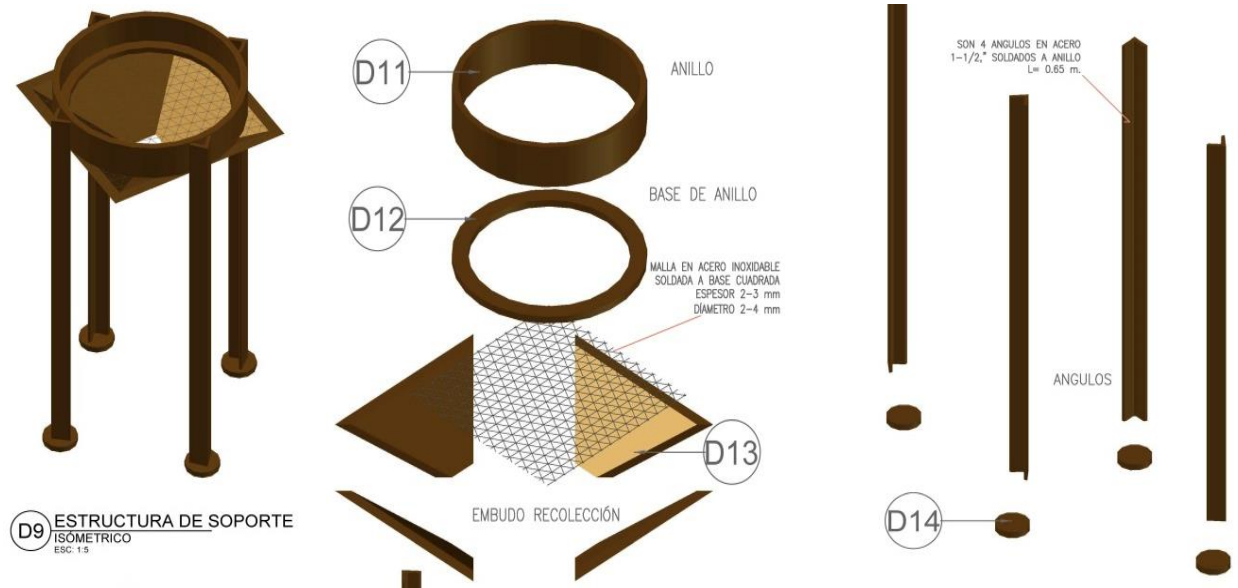
## 4. PILOTO EXPERIMENTAL PARA LA CALIBRACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA ESTRUCTURA

El modelo experimental en laboratorio permite establecer y controlar las condiciones de frontera y de este modo poder determinar el comportamiento del flujo a través de las diferentes capas de suelo que componen la estructura de biorretención. En este capítulo se establecen todos los componentes del montaje experimental, así como el modo en que se capturan los datos y todos los elementos necesarios para la construcción de los medidores, calibración y puesta en marcha del sistema automatizado de recolección de datos.

### 4.1. COLUMNA DE SUELO

Una columna de suelo consiste esencialmente en un medio que contiene un determinado material y permite simular el flujo transitorio y permanente del agua a través del suelo. En el modelo de columna de suelo es necesario que se puedan mantener las condiciones de operación y monitoreo; cualquier cambio resultaría en una medición poco confiable.

Figura 25 Estructura de Soporte de la Columna de Suelo



En la construcción se dimensionó una base de acero (Figura 25 y Figura 26) que soporta la estructura de la columna de suelo. Los elementos de acero son soldados debidamente y recubiertos con pintura anticorrosiva negro mate para proteger el acero que entra en contacto con el agua. Para asegurar el nivel del soporte, todo el conjunto es apoyado en una base que permite realizar nivelación con tornillos de precisión.

Para el fondo se usa malla de acero inoxidable con perforaciones de 4 mm (Figura 27), este elemento garantiza un drenaje en vertical similar a una condición libre, para el acople de este elemento y el embudo de descarga, se optó por usar amarres atornillados con el propósito de poder cambiar el mallado, esto permite usar diferentes diámetros de suelo gracias a un tamiz intercambiable, también, se construye una junta en neopreno para garantizar el sellado hidráulico y evitar fugas de caudal en la descarga.

Una vez atornillados los elementos y como se muestra en la Figura 28 se realiza una prueba de drenaje para establecer si hay fugas y asegurar la condición de descarga libre, esto se logra revisando la distribución de las gotas. Del mismo modo se verifica el sello en el embudo recolector.

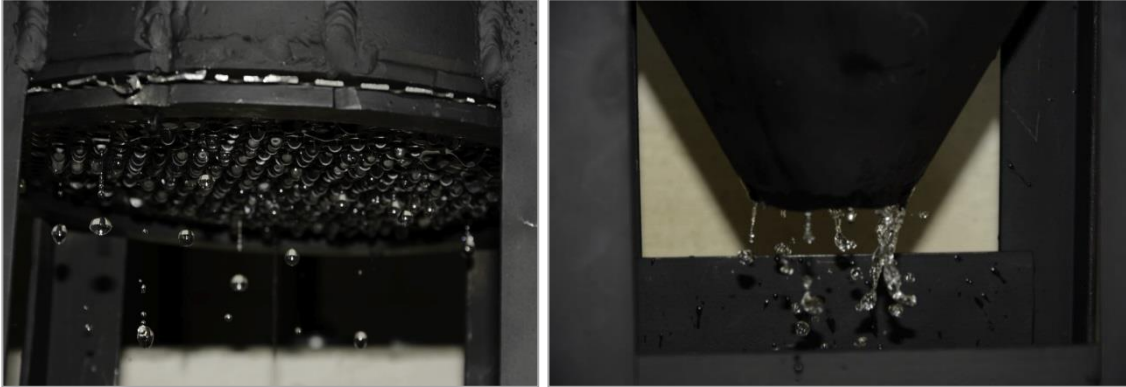
*Figura 26. Soporte en Acero*



*Figura 27. Elementos en la Descarga de la Columna de Suelo*



*Figura 28. Prueba Visual de Distribución de Gotas en la Descarga*



El suelo se confina en un medio rígido que consiste en una tubería de PVC corrugado (Figura 30), que sirve también como frontera para la instalación de los instrumentos electrónicos. La tubería es dispuesta en vertical, verificando el nivel para garantizar el flujo en el sentido de la aceleración de la gravedad. En este elemento se dispone cuidadosamente los suelos seleccionados, respetando las dimensiones y características optadas. Con el propósito de que el área de flujo sea suficientemente representativa, se debe respetar la regla de que el diámetro de la columna sea por lo menos 10 veces el diámetro de las partículas más grandes del suelo usado.

El interior de la columna se monitorea con una serie de sensores dispuestos en el eje perpendicular del tubo, estos permiten conocer: la tensión capilar de las partículas de suelo, el contenido volumétrico de agua y la temperatura en el medio poroso.

Para lograr acoplar los sensores en las paredes de la columna se utilizan:

- Racores de cierre rápido para los medidores de Humedad.
- Uniones dreeser para acoplar los tensiómetros.

Es fundamental que la columna de suelo esté a nivel tanto en vertical como en horizontal, se verifican los niveles con ayuda de un sensor de nivel, niveles de burbuja y una plomada, parte del proceso de nivelación se aprecia en la Figura 29.

*Figura 29. Nivelación de la Columna de Suelo*



Figura 30. Esquema Columna de Suelo

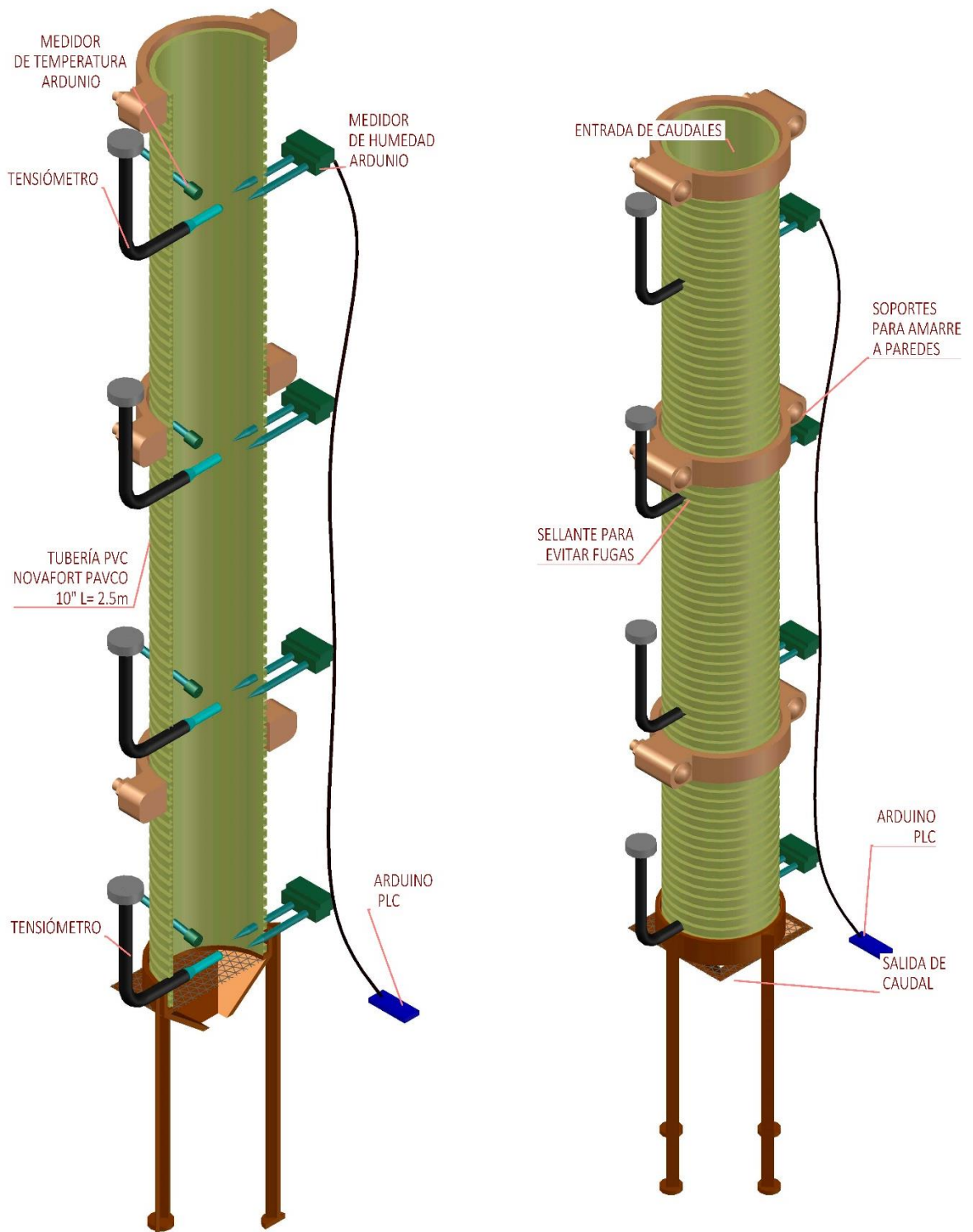
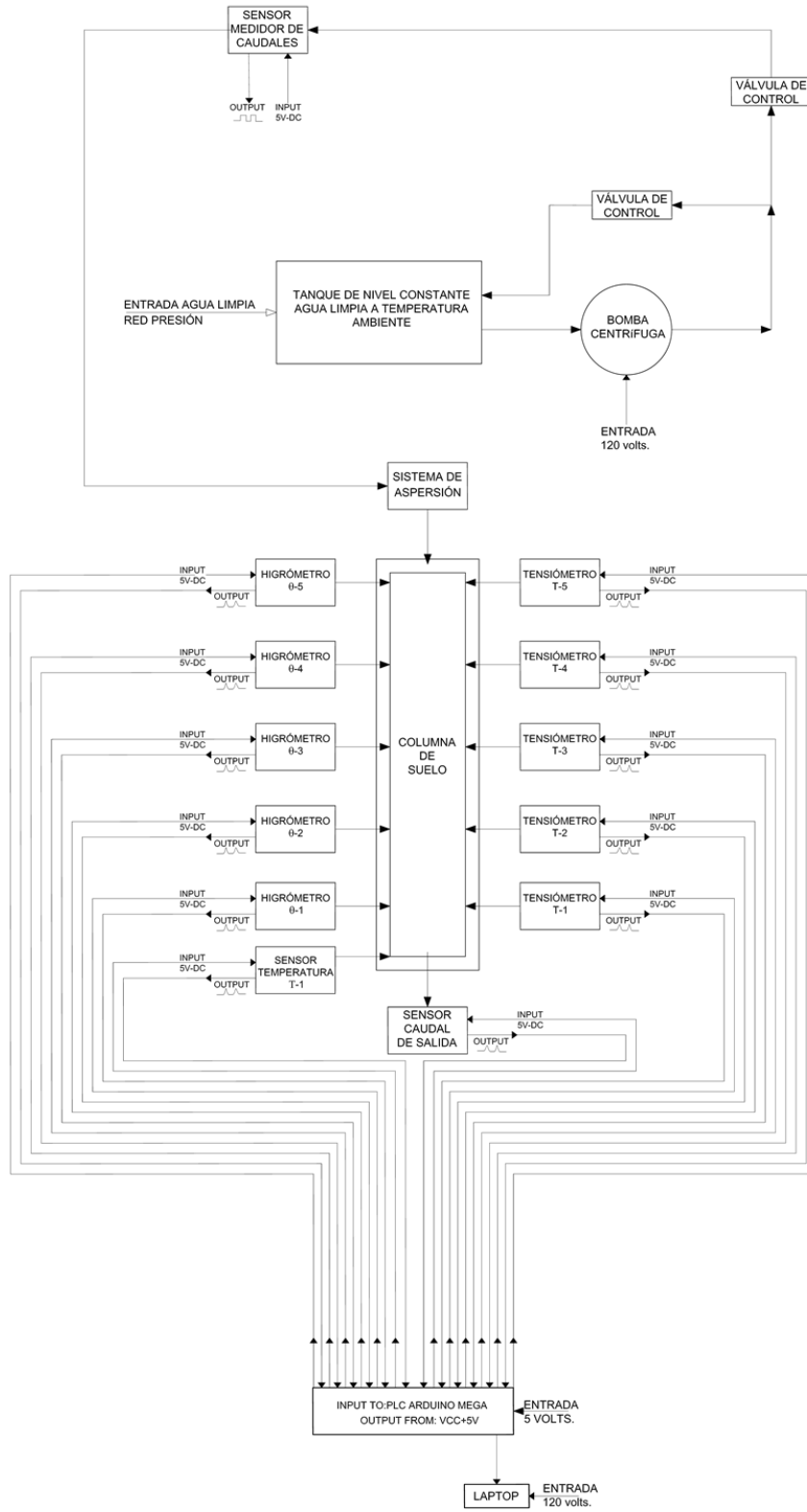


Figura 31. Esquemático del Montaje de Columna de Suelo

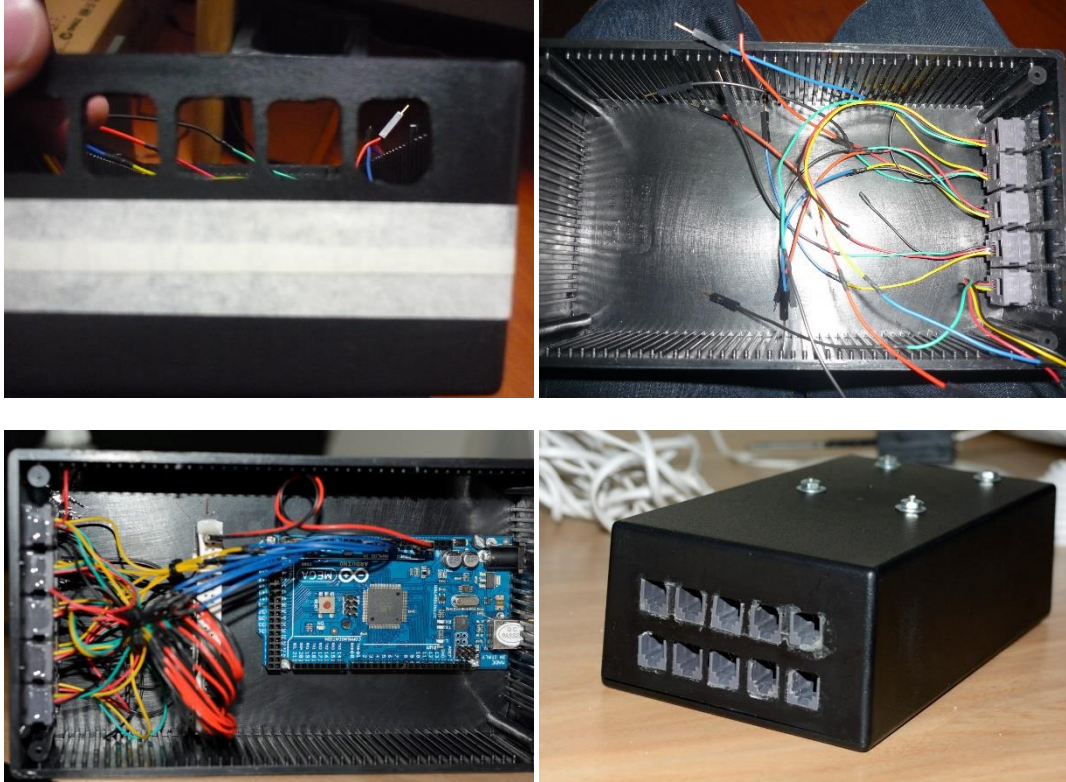




## 4.2. SISTEMA AUTOMATIZADO DE CAPTURA DE DATOS

El sistema automático para la captura de datos está basado en la recolección de las señales de cada uno de los sensores instalados a través de una unidad Arduino Mega que procesa y registra estas señales.

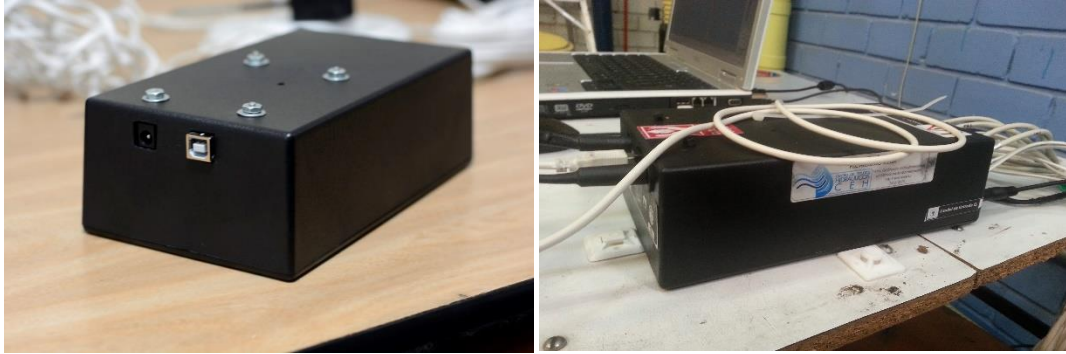
*Figura 32. Proceso de Construcción de la Caja de Control y Recepción de señales*



Para la adecuación del PLC, y como muestra la Figura 32 fue necesario ensamblar una caja de control donde se recoge la totalidad de las señales de salida de los sensores. La construcción de este elemento se realiza sobre una caja estándar para la elaboración de proyectos de electrónica, parte del proceso constructivo se ilustra en la Figura 32.

Cada uno de los sensores requiere tres líneas: positivo (vcc +5v), negativo (tierra) y la salida para la lectura de los voltajes que emite el sensor, cada una de estas líneas se acondiciona con conectores rj 11 que se ensamblan en la caja de control. Para lograr la correcta instalación se perfora la caja y se sueldan estos elementos con pegante epóxico con el propósito de garantizar que la estructura de conexión sea estable. El proceso constructivo y producto final se puede apreciar en la Figura 33.

*Figura 33. Caja de Recepción de Señales*



Tras las primeras pruebas se encontró que la influencia del ruido circundante sobre el PLC era considerable, lo cual podía generar señales contaminadas y datos poco confiables. Para reducir el ruido en la caja recolectora, se recubre toda la superficie interior con aluminio que se pone a tierra para evitar que las diferencias de potencial generadas por las señales circundantes tengan alguna influencia sobre las señales que capta el PLC Arduino Mega. El resultado del apantallamiento con Aluminio se puede apreciar en la Figura 34.

*Figura 34. Apantallamiento con Aluminio en la Caja de Recepción de Señales*



También se observó que existía ruido en la señal debido a la calidad de los cables seleccionados, por esta razón se sustituyeron los cables telefónicos estándar por cables blindados que incluyen conducción para la tierra y recubiertos con aislante grueso, los cables utilizados se pueden apreciar en la Figura 35.

*Figura 35. Cables utilizados para el transporte de las señales*

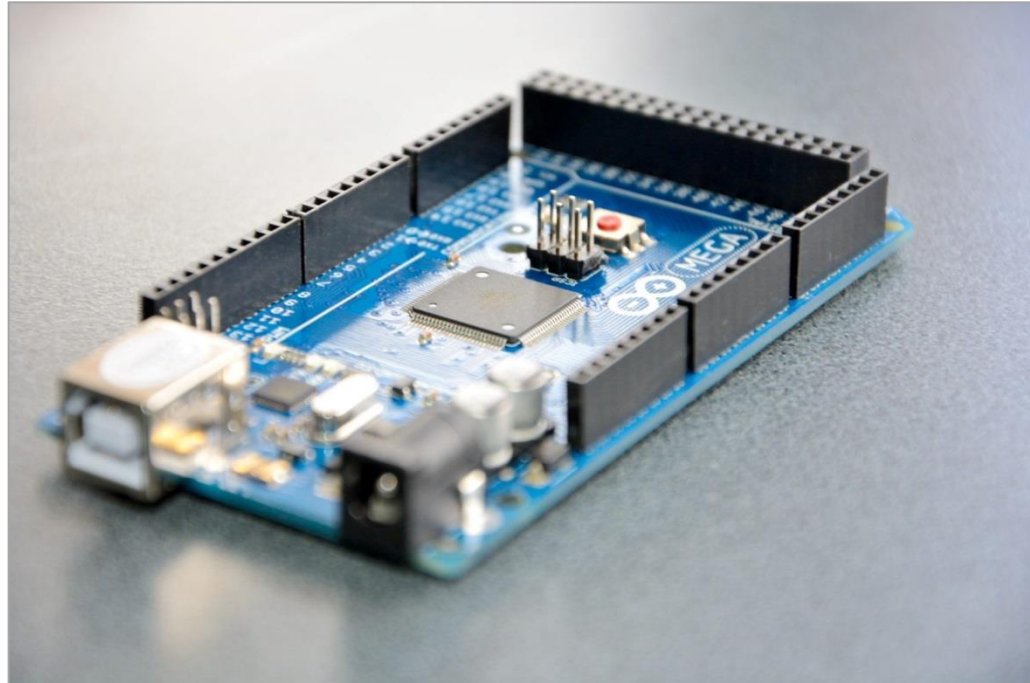


#### 4.2.1. PLC Arduino Mega

El PLC utilizado para el monitoreo y control de los sensores que componen la columna de suelo es un microcontrolador Arduino Mega 2560 (ver Figura 36). Esta tarjeta cuenta con 54 puertos digitales de entrada y salida y 16 puertos análogos.

El PLC Arduino brinda la posibilidad de controlar todos los sensores e instrumentos que se van a utilizar en el montaje, cada sensor se conecta directamente a este sistema, lo que permite visualizar en tiempo real el comportamiento de los sensores.

*Figura 36. PLC Arduino MEGA*

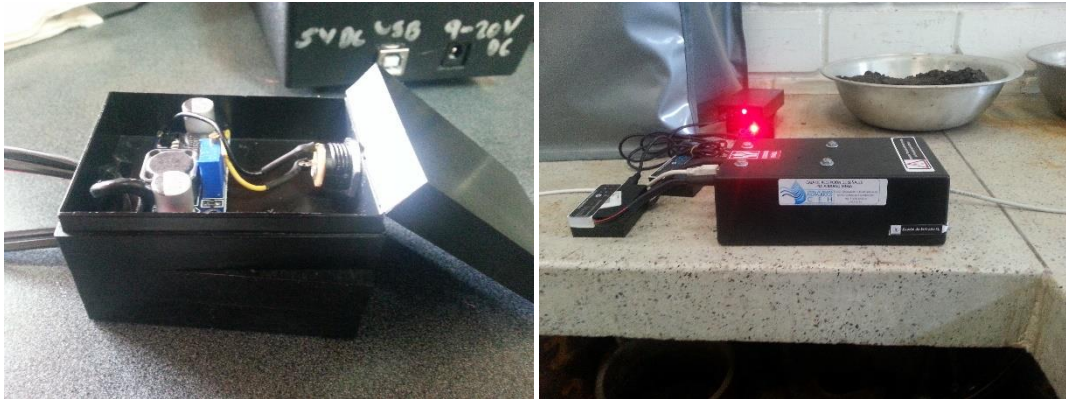


#### 4.2.2. Alimentación Eléctrica del Sistema

El PLC Arduino puede ser alimentado directamente desde un computador, sin embargo, si se tiene en cuenta la capacidad de carga que puede brindar una computadora portátil, no es recomendable utilizar este medio como fuente de energía, entre otras cosas, porque generaría interferencia en las señales emitidas por los sensores y una variación en el voltaje de entrada. Se requiere una fuente de energía que sea estable y que garantice una corriente regulada. Por estas razones se optó por utilizar baterías recargables de 12 v con 4500 mA de capacidad. Se utilizan dos unidades, una para alimentar adecuadamente el PLC Arduino y la otra para alimentar la totalidad de los sensores y de este modo no generar pérdidas de voltaje por el aumento del amperaje requerido por cada sensor.

Para garantizar un voltaje constante se acopla un módulo Regulador de Voltaje para Arduino en la salida de cada batería y se mide un voltaje en la salida de este de 10.50 voltios para alimentar el PLC Arduino y de 5.14 voltios para alimentar los sensores. Los valores establecidos se seleccionan luego de realizar varias pruebas donde se observó que los valores seleccionados eran adecuados para la estabilidad de las señales en todo el sistema. En la Figura 37 se muestran los componentes utilizados para la alimentación de los sensores y el PLC.

Figura 37. Baterías y Fuente Reguladora en la Caja de Recepción de Señales

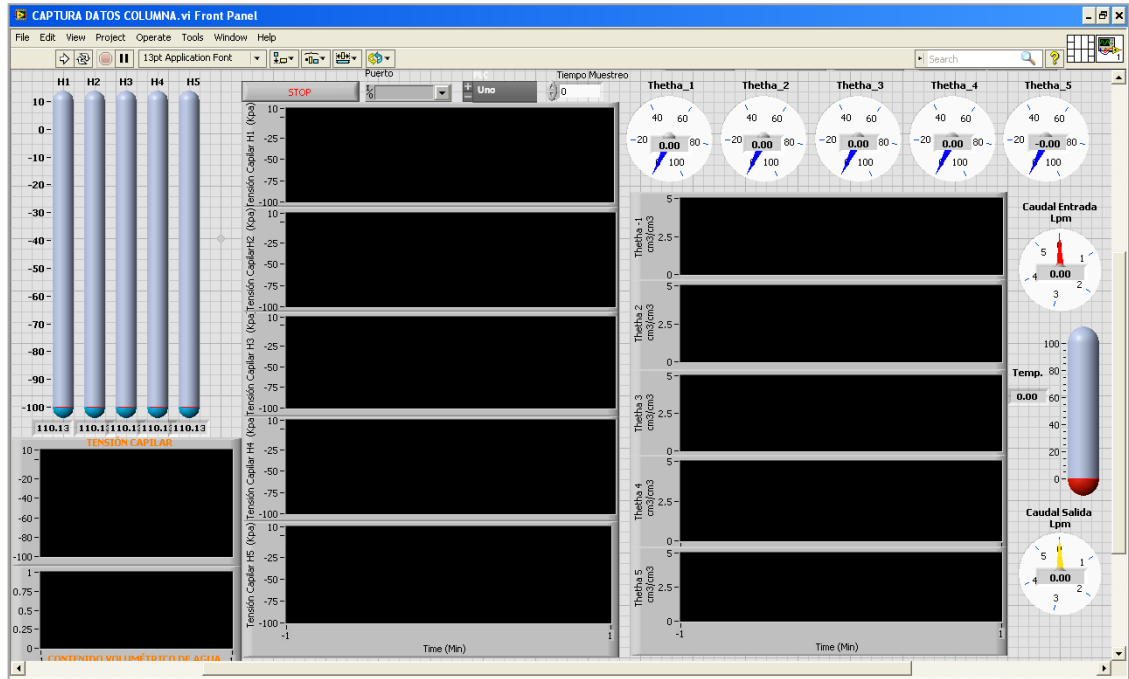


#### 4.2.3. Interface y Presentación de Datos en LAB VIEW

LAB VIEW es un Herramienta que ofrece un entorno gráfico muy intuitivo, proporciona un completo entorno para el diseño de aplicaciones de ingeniería de adquisición de datos, análisis de medidas y representación de datos gracias a un lenguaje de programación fácil de comprender, sin necesidad de tener conocimientos profundos en programación.

La interface que se propone es una ventana que muestre la totalidad de los sensores para poder visualizarlos en tiempo real de tal modo que se puedan monitorear todos los instrumentos en un mismo instante de tiempo, la presentación de los datos en LAB VIEW se puede apreciar en la Figura 38. La programación se desarrolla a partir de la unión de pequeños programas individuales para cada sensor, lo que permitió realizar pruebas de funcionamiento separadas antes de fusionar todo el código.

Figura 38. Interface en LAB VIEW para Visualización de Datos



En la Figura 38 se aprecia el panel de monitoreo y control de la totalidad de los sensores puestos en la columna de suelo. Se presentan los resultados de forma puntual y con un progreso gráfico en el tiempo para cada una de las variables medidas:

Las cabezas de presión o tensión capilar (succión): H1 a H5 en (KPa)

Contenido volumétrico de agua: Theta\_1 a Theta\_5 en  $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ .

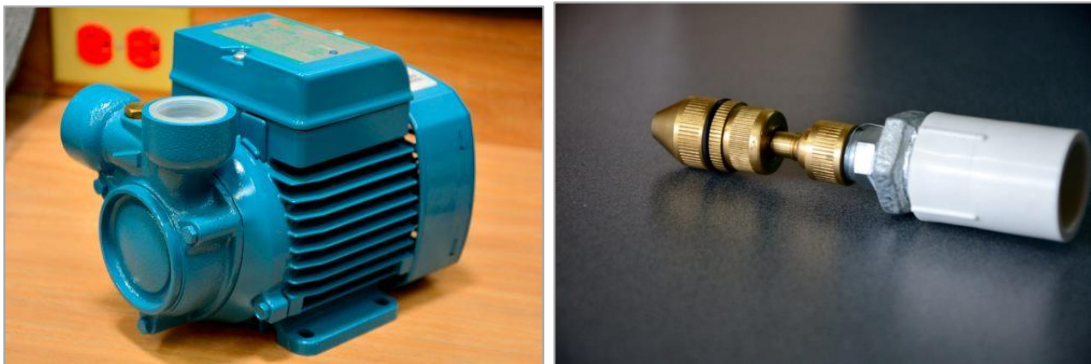
Caudal de entrada y caudal de salida en Lpm.

Temperatura: Temp. En grados centígrados.

#### 4.3. SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DE CAUDALES

El suministro de caudales a la columna de suelo se realiza con una bomba centrífuga que impulsa el fluido, almacenado en un tanque (Figura 40), a través de una tubería. La entrega del caudal sobre la columna de suelo se realiza por medio de una boquilla atomizadora de abanico plano que distribuye uniformemente las gotas sobre la superficie de la columna, este accesorio junto con la bomba se puede apreciar en la Figura 39. Para la instalación de la boquilla se realiza un acople a una tubería de  $\frac{1}{2}$ " por medio de un buje de hierro galvanizado.

Figura 39. Bomba y Válvula Atomizadora



El sistema de medición de caudales se compone de dos partes que utilizan métodos diferentes para medir el caudal, para el caudal de entrada se utiliza, en primer lugar, una válvula manual para regular el flujo de descarga de la bomba, que permite modificar el volumen de agua que llega a la columna de suelo. Justo antes de la entrega a la columna de suelo se condiciona un sensor que mide el flujo de agua. El caudal de salida se mide utilizando el método gravimétrico, el instrumento usado es un tanque equipado con un sensor de presión el cual permite conocer el valor de la presión de fondo y a su vez el nivel o el peso del fluido contenido. Este tanque cuenta con un vertedero de control conectado a la descarga general del laboratorio. El sensor utilizado para la medición de la presión es el *MPX2010DP* con un rango de medición de 0 a  $\pm 1$  m.c.a. el tanque de recolección (ver Figura 41) tiene una capacidad de 10 litros que son suficientes dadas las características de porosidad de los suelos utilizados.

En la Figura 42 se muestra el sistema de tuberías para la alimentación de caudales, se puede apreciar la válvula de alimentación de caudales, un sistema de retorno sobre el tanque, la boquilla de aspersión, el sensor de medición de caudales y la conexión a la columna de suelo. Todo este sistema se probó para comprobar que no existieran fugas y se aseguró a los muros mediante soportes anclados en la pared.

Figura 40. Tanque de Almacenamiento de Agua Nivel Constante



Figura 41. Tanque de Recolección de Volúmenes en la Salida de la Columna de Suelo



Figura 42. Sistema de Tubos para la Alimentación de Caudales

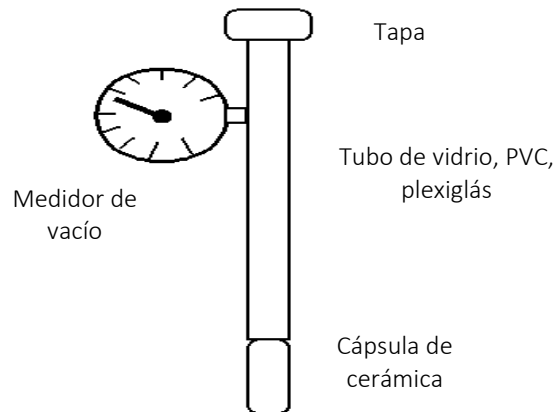


#### 4.4. CONSTRUCCIÓN DE TENSIÓMETROS

Un tensiómetro es un instrumento que permite medir la presión en los poros en el suelo, es decir, el potencial hídrico de suelo. Son útiles para medir la humedad natural del suelo in situ (Calderon, 2014). Un tensiómetro tiene tres componentes básicos interconectados:

- Medidor de presión
- Medio de contacto en el suelo
- Medio de transmisión de presión

Figura 43. Esquema General de un Tensiómetro



Un tensiómetro consiste en un tubo lleno de agua destilada (medio de transmisión de presión) que se conecta en uno de sus extremos a una cápsula de cerámica porosa (medio de contacto con el suelo) y el otro, a un instrumento para medir la presión de vacío (manómetro, transductor de presión, columna de mercurio etc.). Es importante que la cápsula porosa tenga una conductividad y porosidad constantes, esto garantiza que la comunicación capilar sea la misma en toda la superficie de la cápsula.

Cuando el instrumento es colocado en el suelo, el medio de transmisión en el tensiómetro entra en equilibrio capilar con el agua contenida en el suelo a través de la cápsula de cerámica, una vez establecido este equilibrio, y basado en el principio de pascal, la presión del suelo es transmitida al medidor de presión, lo que permite conocer la presión del agua en el suelo.

Existe una gran variedad de medidores de vacío entre los cuales se pueden mencionar:

- Manómetro diferencial de mercurio (el más preciso)
- Manómetro de *Bourdon*
- Sensor electrónico de presión (transductor de presión)

En este caso se ha seleccionado el sensor electrónico como instrumento para la medición de la presión de vacío, es adecuado porque es posible capturar los datos en tiempo real utilizando un PLC (Arduino Mega 2560).

Actualmente existe una gran variedad de transductores de presión en el mercado, para la selección se tuvo en cuenta el rango de medida y la precisión del sensor. El sensor utilizado es **MPX 2102AP** de Motorola, que tiene un rango de medición que va desde 0 *Kpa* hasta 100 *Kpa* (Motorola Inc., 2003, pp. 3–40), adecuado para la mayoría de los suelos usados en este estudio.

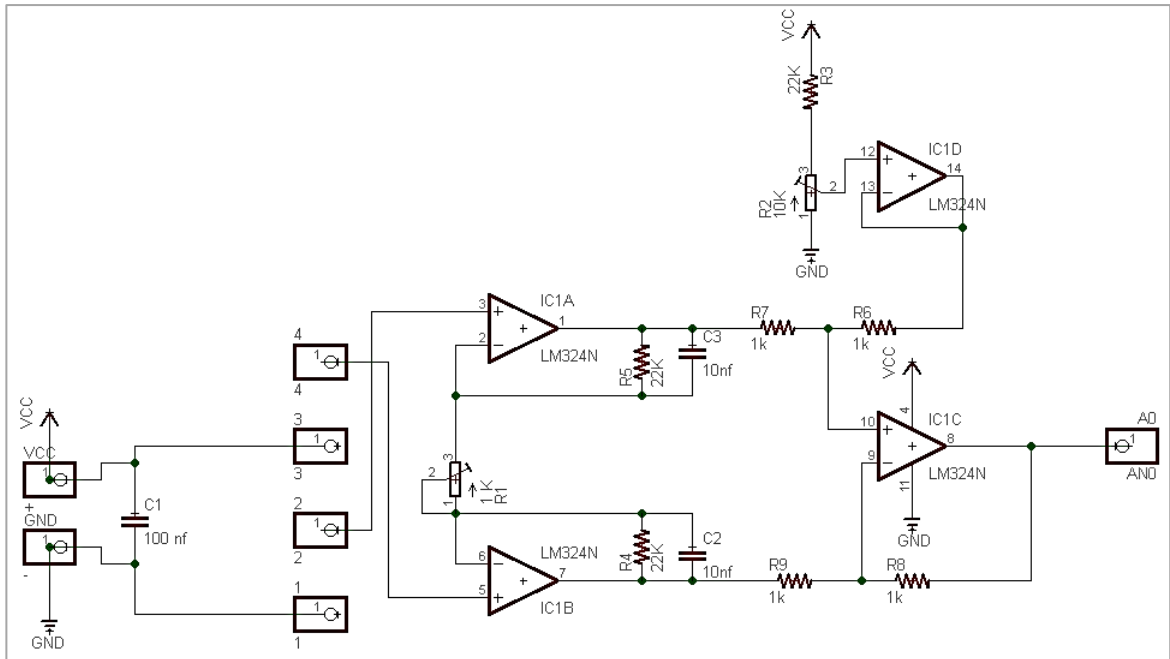
Figura 44. Sensor de presión MPX 2102AP



El **MPX 2102AP** es un sensor que mide la presión absoluta a través de un silicón piezoresistivo sobre el cual actúa la presión externa enfrentada en una cámara sellada al vacío. Este sensor es utilizado actualmente en la fabricación comercial de tensiómetros y ha mostrado un comportamiento adecuado para este tipo de instrumentación.

La sensibilidad del sensor se encuentra en  $0.4 \text{ mV/Kpa}$  lo que indica que es necesario el uso de un circuito amplificador para poder ser leído a través del PLC Arduino. (Oxer & Blemings, 2009) recomienda el circuito amplificador mostrado en la Figura 45, que a su vez está basado en las recomendaciones dadas por el fabricante, a este circuito se le hacen pequeñas modificaciones para poder ser utilizado con este sensor en particular.

Figura 45. Esquema del Circuito Amplificador para Sensores de presión, tomado de: (Oxer & Blemings, 2009) modificado, re-escrito y editado por el autor.

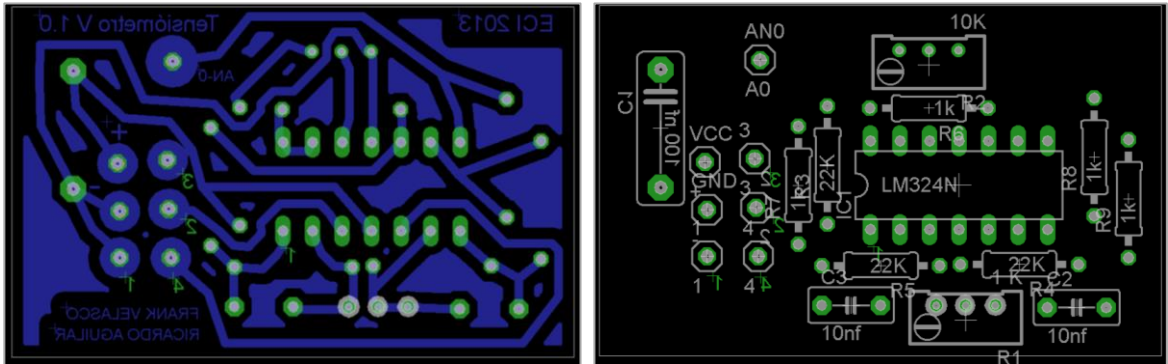


El circuito esquemático se realizó en el programa EAGLE (Easily Applicable Graphical Layout Editor, versión Freeware) para posteriormente crear la *printed circuit board* (PCB), se organiza la posición de los componentes



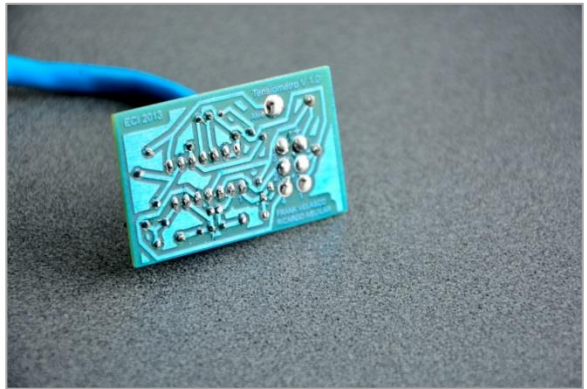
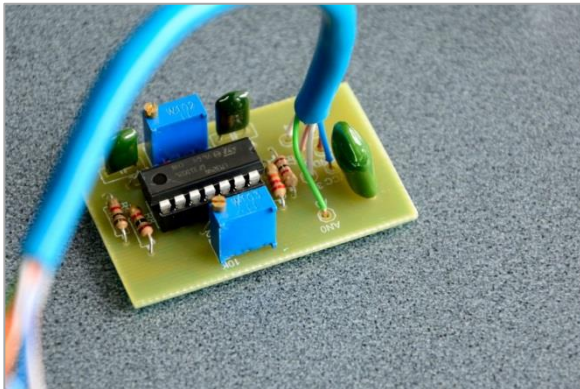
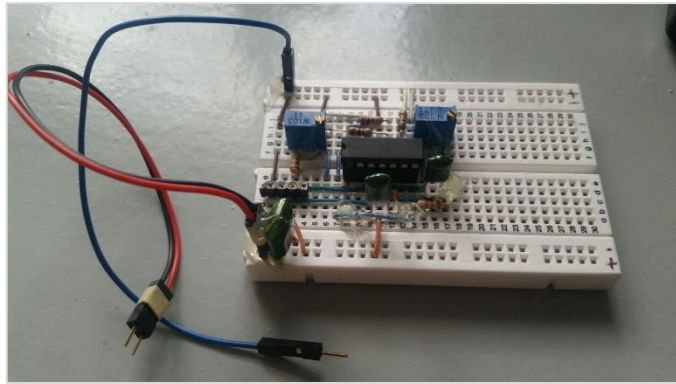
para crear una placa compacta fácil de instalar, el diseño final del amplificador se puede apreciar en la siguiente figura:

Figura 46. PCB para el amplificador de los sensores de presión MPX2102AP/ MPX2010DP



Dicha placa es construida en fibra de vidrio, recubierta y protegida con silicona, en la Figura 47 se puede apreciar el armado en protoboard y el modelo final.

Figura 47. Proceso de diseño de la PCB Amplificador para Tensiometro



Para el acople del sensor y el circuito se construyen conectores con regleta macho/hembra con el propósito de poder conectar y reemplazar el sensor. Se usan cajas plásticas para proteger el circuito y el sensor, para la comunicación con el PLC se prevé usar cable con conexión RJ-11 (Figura 49) que llevará tres líneas básicas: línea para datos, línea voltaje positivo (VCC) y línea voltaje negativo (GND).

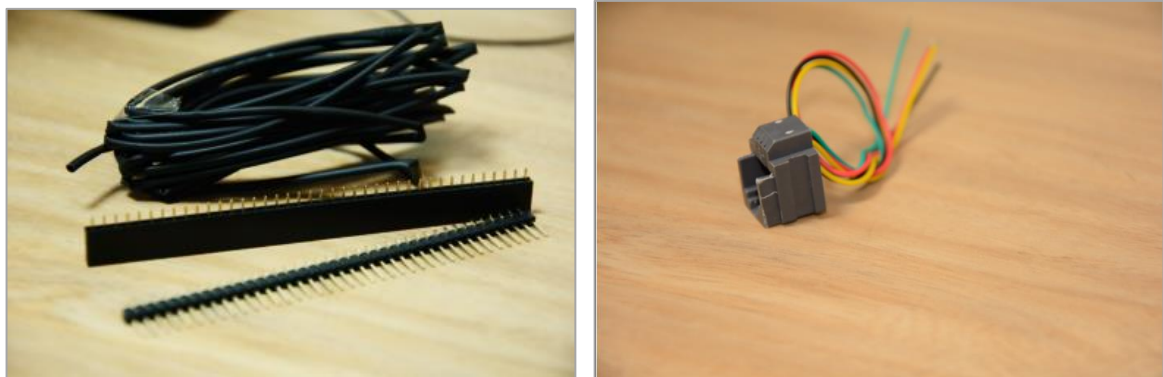
El proceso de construcción comienza con la selección de la caja plástica (Figura 48), y la construcción de los conectores usando la regleta adecuada, soldando cada terminal al cable correspondiente, que finalmente se recubre con tubo termo-encogible para evitar el contacto con cables desnudos.

*Figura 48. Caja para el Transductor de Presión*



Una vez construido el enchufe hembra, en el cableado del conector RJ-11, se pega con soldadura epóxica en la cavidad labrada en la base de la caja, del mismo modo, de la placa PCB Figura 50, se suelda regleta hembra para conectar el sensor y un enchufe macho que acopla en el conector RJ-11 hembra mencionado anteriormente.

*Figura 49. Conector RJ-11, Tubo Termo-encogible y regletas*



*Figura 50. Preparación de la PCB para el Soldado de Conectores*

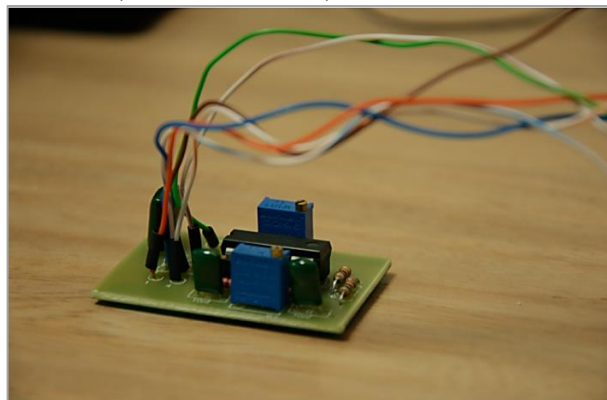


Figura 51. Detalle del Proceso Constructivo de la Caja del Transductor de Presión Soldado de Conectores

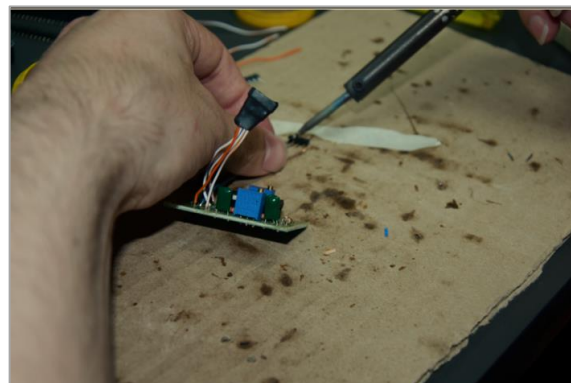
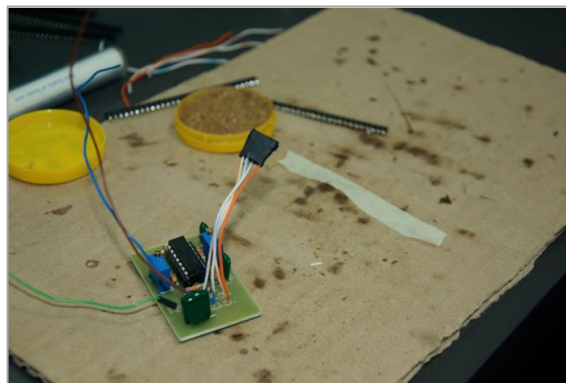
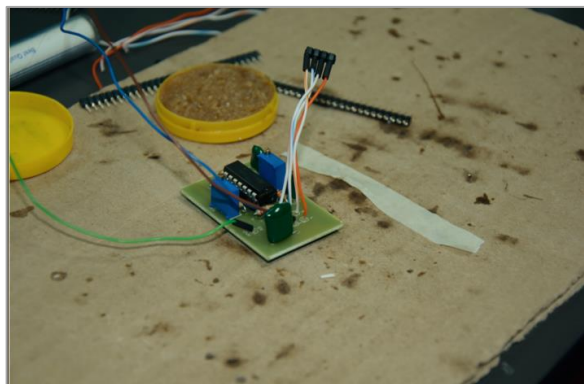
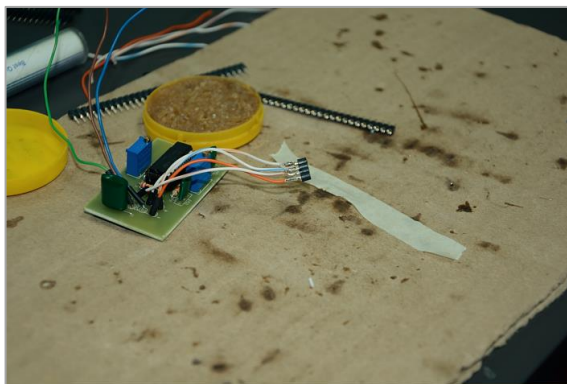
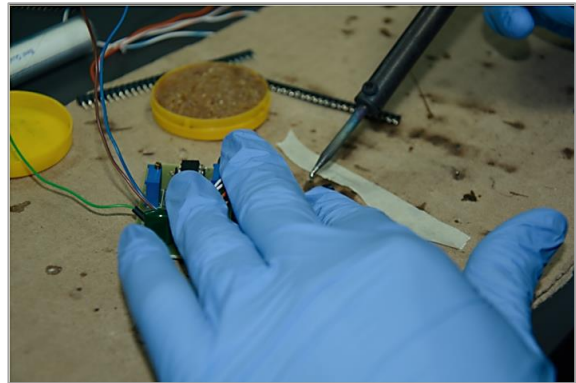
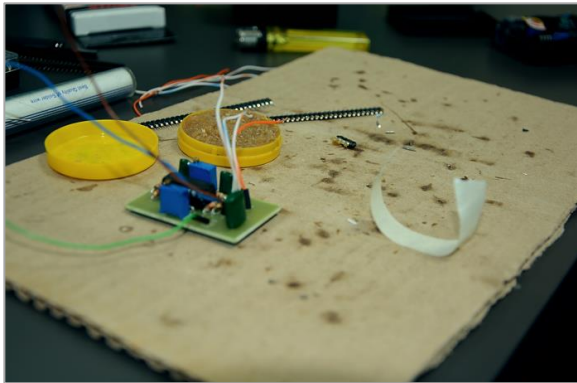


Figura 52. Detalle del Proceso Constructivo de la Caja del Transductor de Presión Pegado del Enchufe y Conector Rj-11

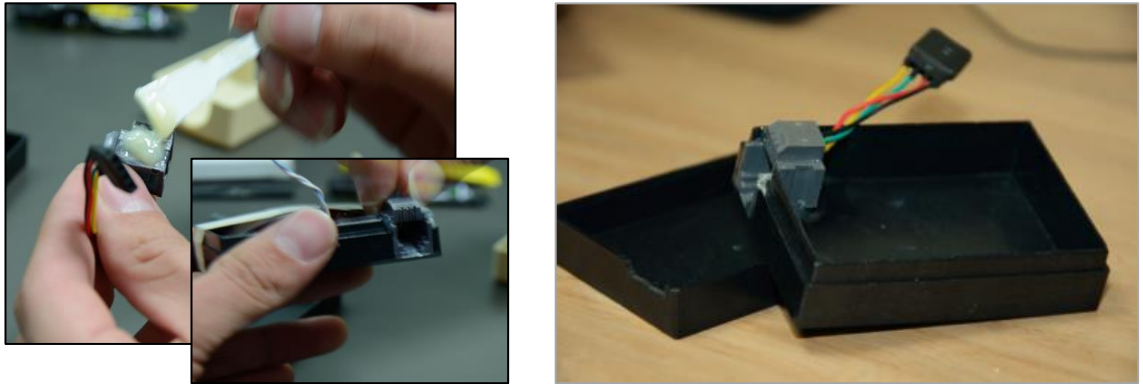
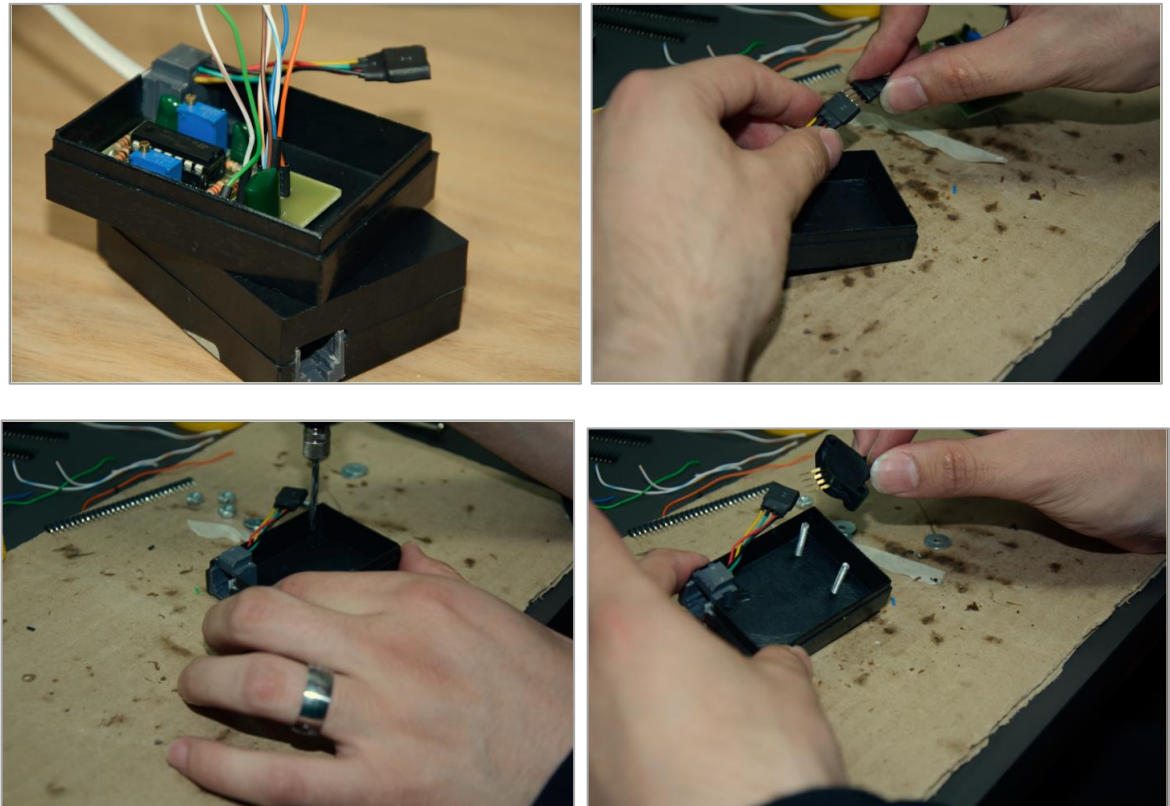
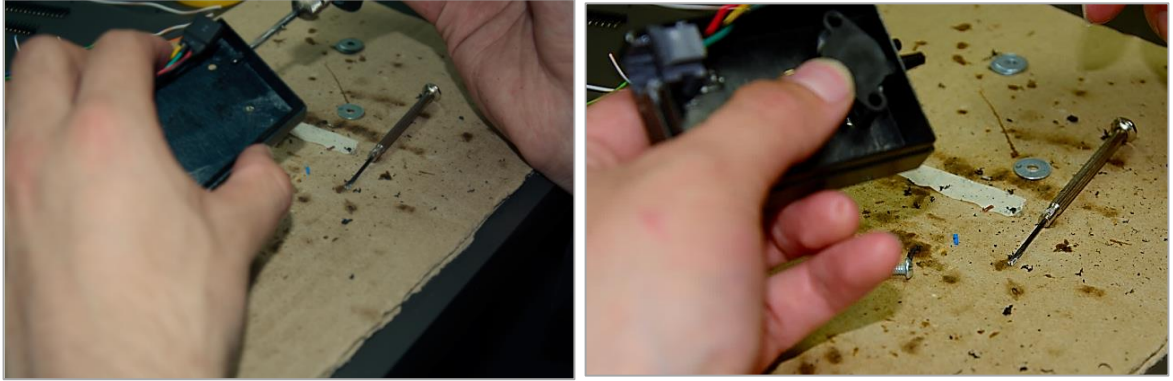


Figura 53. Detalle del Proceso Constructivo de la Caja del Transductor de Presión Acople de PCB y Atornillado del Sensor de Presión





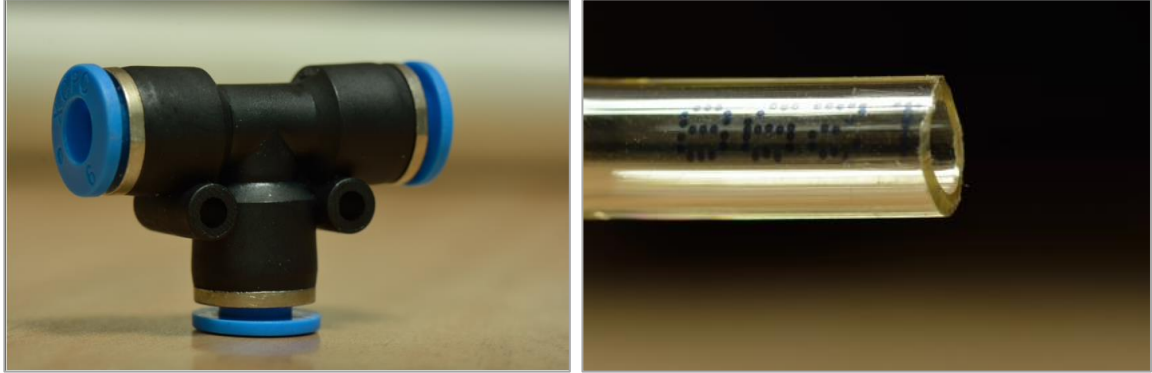
*Figura 54. Detalle del Proceso Constructivo de la Caja del Transductor de Presión y Presentación Final del Transductor de Presión*



Una vez construida, la caja se conecta al cable construido a través del conector RJ-11 y se comprueban todas las conexiones con ayuda de un multímetro, luego, se alimenta el sensor con una fuente de 5 voltios, se mide el voltaje de salida del sensor y se comprueba su funcionamiento. El proceso constructivo y de verificación se realiza del mismo modo para todos los transductores, en total se construyen 5 unidades con el sensor **MPX 2102AP** y una con el sensor **MPX 2010 DP**.

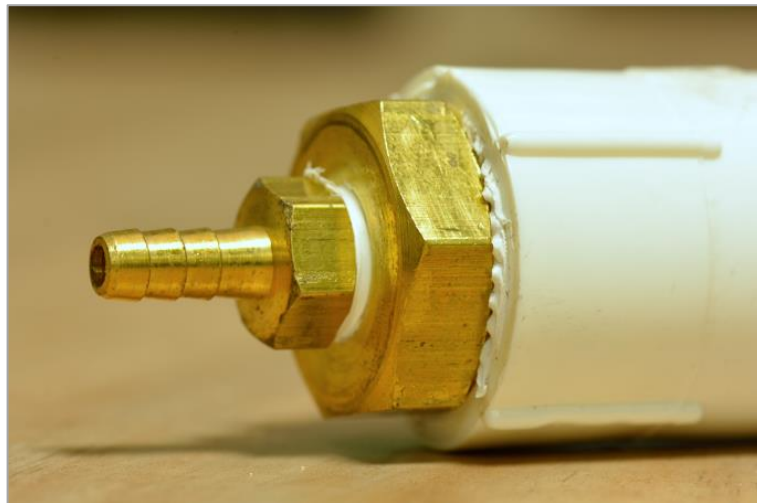
El material elegido para el cuerpo del tensiómetro es el PVC, por su fácil manipulación en la construcción. Para acoplar la caja del sensor se utilizan uniones tipo racor de cierre rápido y manguera de 6 mm de diámetro, fabricada para transporte del flujo a presión hasta los 150 PSI, estos componentes se aprecian en la Figura 55.

Figura 55. Racor de Cierre Rápido y Manguera para Acople



El acople de la manguera a la tubería de PVC se logra a través de un racor mecánico de rosca en bronce para hacer cambio de diámetro de 1/2" a 1/8" como se muestra en la Figura 56, también es necesario utilizar un acople tipo unión roscada para conectar la tubería de PVC al bronce, todos los elementos PVC se limpian y pegan con soldadura especial para PVC.

Figura 56. Racor de Bronce 1/2"-1/4" y 1/4"-1/8" Acoplados con Union Roscada a Tubería de PVC



Para lograr la correcta transmisión de la presión de succión del suelo al sensor, se utiliza una cápsula de cerámica porosa con porosidad y conductividad constante testeada en un laboratorio especializado<sup>2</sup>, la cual permite que haya una frontera adecuada entre el suelo y el líquido utilizado para la transferencia de la presión (se utiliza agua destilada). La cerámica porosa se pega con soldadura epóxica (Figura 57), teniendo cuidado de que su alineamiento sea perfecto y que el sello sea uniforme.

---

<sup>2</sup> Dr. Calderón Labs S.A.

Figura 57. Cápsula Porosa para Tensiómetro



Finalmente se acoplan todos los componentes en un soporte metálico (acero inoxidable), el despiece de este soporte se muestra en la Figura 58 el resultado final del tensiómetro se muestra en la Figura 59.

Figura 58. Esquema del Soporte Metálico para Tensiómetro (Dim. (mm))

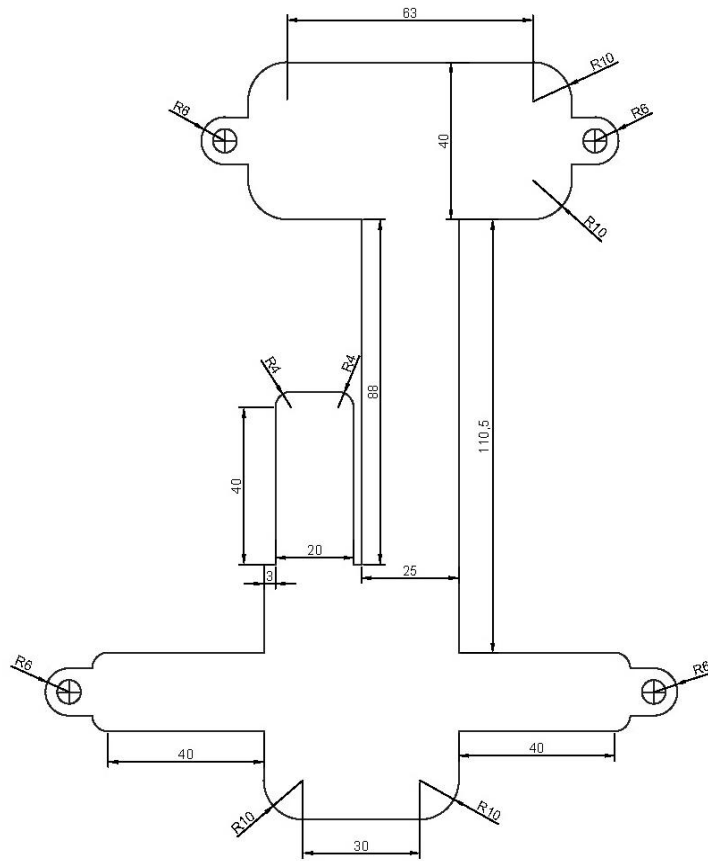
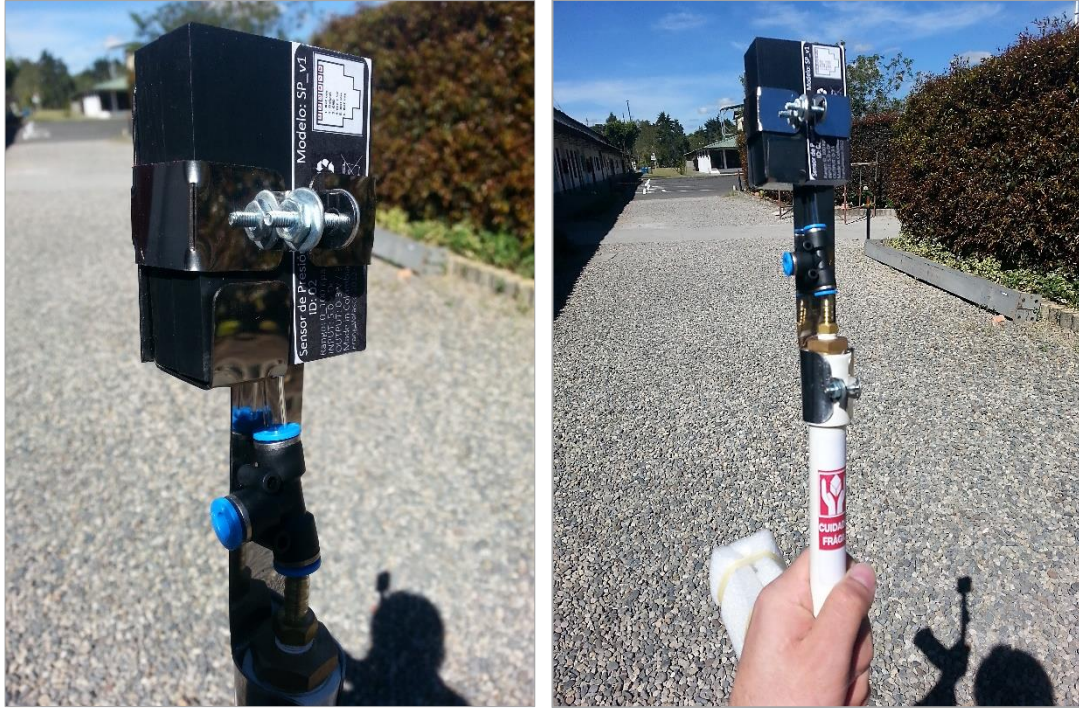


Figura 59. Resultado Final del Tensiómetro Propuesto



#### 4.5. CONSTRUCCIÓN DE MEDIDORES DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA

Los medidores que se proponen se clasifican como resistivos y consisten básicamente en dos barras separadas una cierta distancia, una que conformaría lo que se denomina ánodo y la otra el cátodo. Este esquema permite que se establezca una diferencia de potencial en el medio, este campo es función principalmente de (Calderon, 2014) la conductancia y la corriente tal como lo ilustra la ecuación (11):

$$I_t = K_t V_t \tag{11}$$

Donde:

$I_t$ : Corriente entre los electrodos

$K_t$ : Conductancia

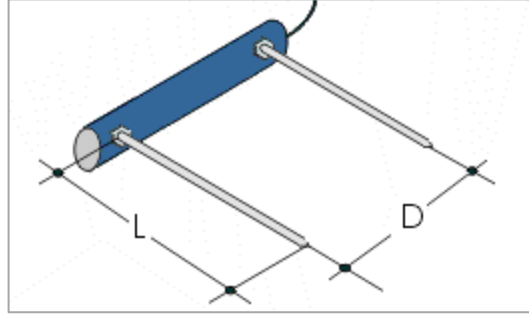
$V_t$ : Voltaje

La conductancia es función de las características del sustrato, de la geometría de los electrodos, de la conductividad eléctrica del medio y principalmente del contenido volumétrico de agua (Calderon, 2014). Esta relación permite conocer el contenido volumétrico de agua en función del voltaje.

Bajo este principio, se fabrican electrodos con los cuales se puede medir la diferencia de potencial para un determinado contenido de humedad dado. Para lograr un resultado satisfactorio se deben cumplir las siguientes recomendaciones en la geometría del electrodo (Calderon, 2014):



Figura 60. Esquema General de un Electrodo (Calderon, 2014)



$$\frac{L}{D} = 1 \phi_{barras} < \frac{1}{15} D$$

Con base en la investigación de Phd. Calderón (Calderon, 2014), estas relaciones garantizan que la constante de celda del electrodo tienda ser constante.

En la fabricación del electrodo se usó inicialmente barras de acero galvanizado, sin embargo, luego de las primeras pruebas se encontró que el material se había corroído debido a las condiciones del medio y posiblemente, a la ionización de las barras. Las pruebas realizadas en un suelo granular durante más de un mes, con barras de acero inoxidable 316, resultaron satisfactorias.

Para las condiciones de laboratorio es necesario tener un volumen apropiado de influencia del campo resistivo, para establecer esta medida se sigue la recomendación dada por (Calderon, 2014), que en sus estudios encontró que con un valor de  $D = 5$  cm podría medirse el contenido volumétrico de humedad en un medio cilíndrico de 20 cm de diámetro, que resultan apropiados para las dimensiones de la columna de suelo que se usará en este estudio.

Características del electrodo usado:

Diámetro de barras  $\phi$ : 1/8"

Material: acero inoxidable 316.

Separación entre barras  $D$ : 50 mm

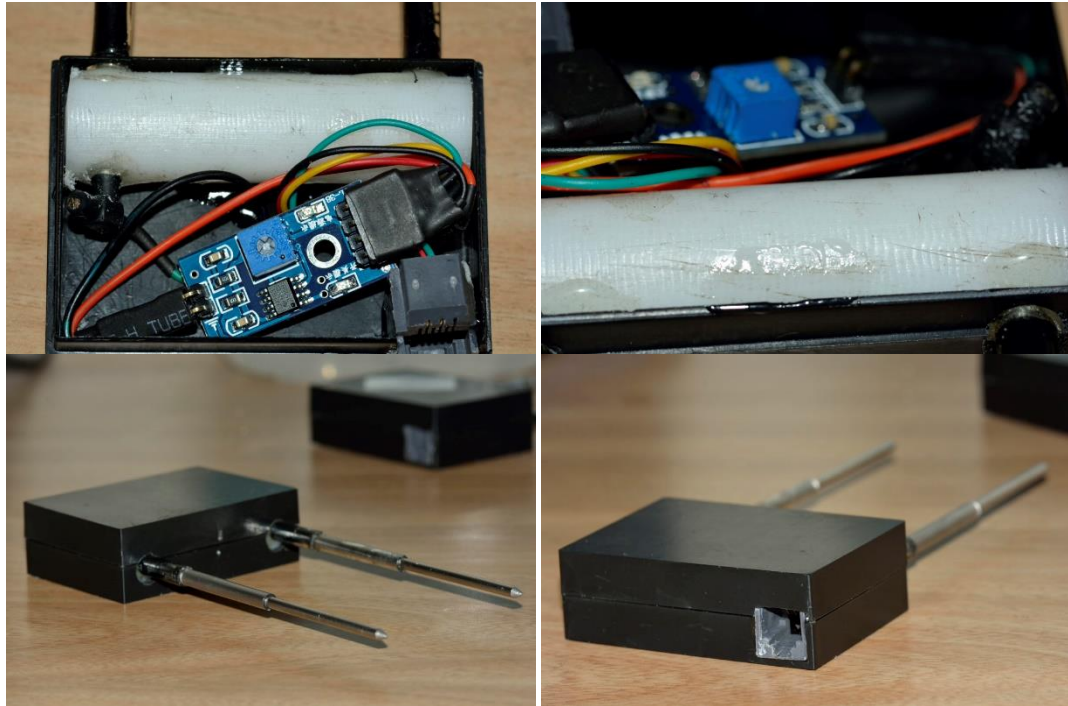
Longitud de contacto entre barras  $L$ : 50 mm

Con las dimensiones establecidas se verifica que estas estén en entre los límites recomendados:

$$\frac{L}{D} = \frac{50}{50} = 1 \phi_{barras} < \frac{1}{15} D \quad 3.175 < 3.33 \text{ OK}$$

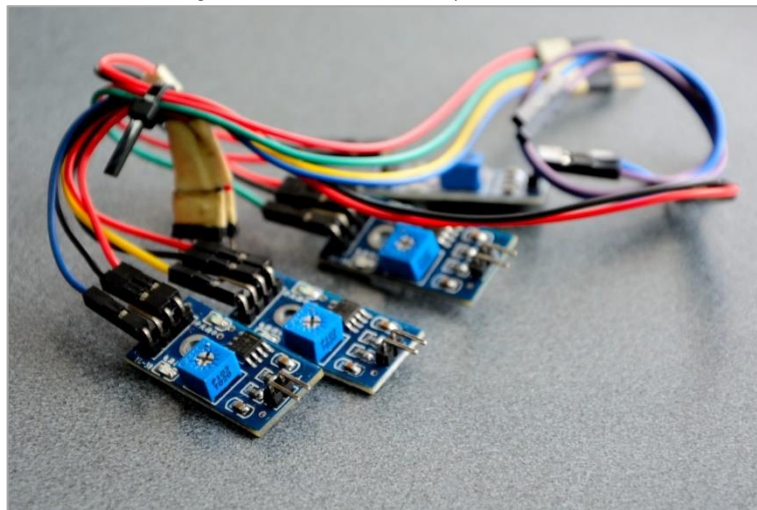
Para la adecuación y conformación del medidor se sigue el mismo principio constructivo utilizado para los tensiómetros (4.4 pág. 19), el resultado se muestra siguiente figura:

Figura 61. Construcción de Medidores de Humedad en el Suelo



Es necesario utilizar un módulo especialmente diseñado para Arduino y que permita captar la resistividad o caída de potencial que se produce en los electrodos, este módulo es el módulo YL-38, la medición del contenido volumétrico de agua ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ) se realiza con sensores que muestran la humedad teniendo como base la resistividad eléctrica de medio circundante en la Figura 62 se pueden apreciar estos módulos.

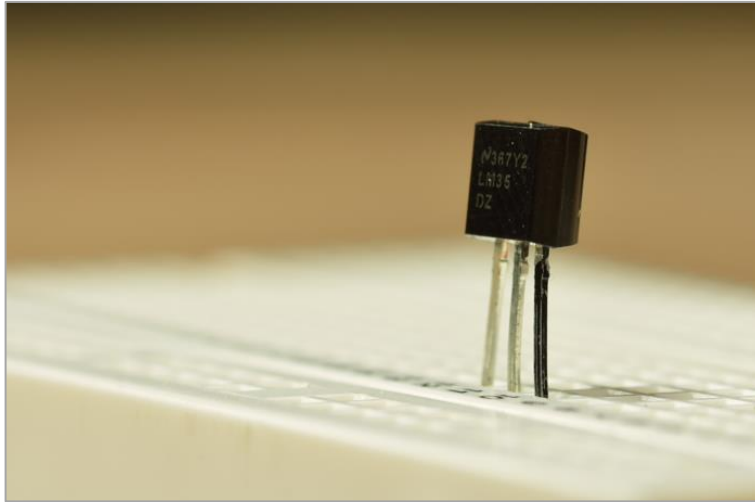
Figura 62. Módulos YL-38 para Arduino



#### 4.6. CONSTRUCCIÓN DEL MEDIDOR DE TEMPERATURA

Existen gran variedad de sensores que permiten medir la temperatura con gran precisión y sin necesidad de otros complementos. El sensor que se utiliza es el LM35 fabricado por *Texas Instruments*. Este sensor está diseñado para registrar una relación lineal entre el voltaje y la temperatura en todo el rango de medición que va desde -55 °C hasta 150 °C (Texas Instruments, 2013, p. 1)

*Figura 63. Sensor LM35 para Medición de Temperatura*



La medición de la temperatura se realiza sobre una superficie de suelo que alcanzará niveles cercanos a la saturación del suelo, por lo tanto, es necesario proteger el circuito del contacto con el agua.

Se construye una termo-cupla conteniendo el sensor dentro de un tramo de una tubería de plástico resistente a la temperatura, que se rellena de soldadura epóxica para aislarlo del medio, se tiene especial cuidado de exponer la superficie del sensor con el fin de permitir la medición de la temperatura. Se utiliza una línea blindada con un conector estéreo para el acople al PLC Arduino Mega. El resultado se muestra en la Figura 64:

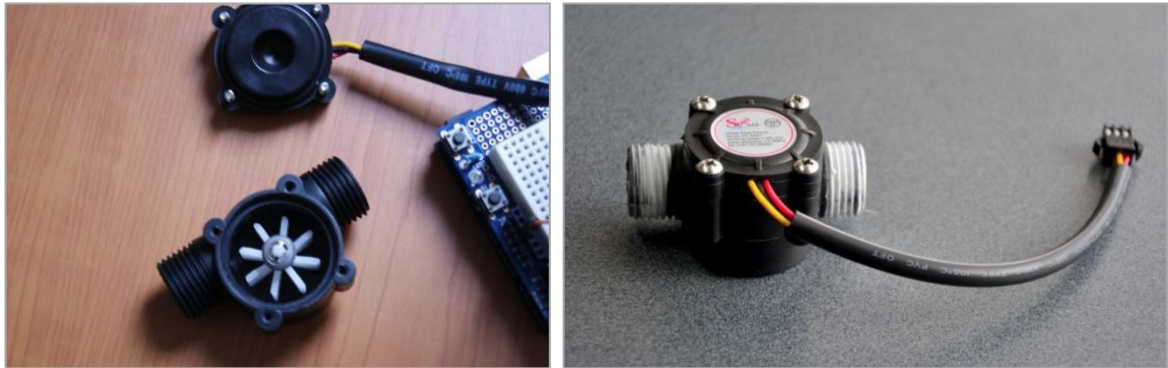
*Figura 64. Medidor de Temperatura*



#### 4.7. MEDIDORES DE CAUDALES

Para medir el caudal de entrada se utiliza, en primer lugar, una válvula manual para regular el caudal de descarga de la bomba, que permite modificar el volumen de agua que llega a la columna de suelo. Justo antes de la entrega a la columna de suelo, se instala un sensor que mide el flujo de agua de referencia YF-S201 que tiene un rango de medición desde 1 hasta 30 Lpm, es perfectamente funcional en presiones por debajo de 2 Mpa, también se utilizó el sensor YF-S401 con un rango de medición de 0.3-6 Lpm (ver Figura 66).

Figura 65. Sensor de Flujo YF-S201



El sensor de flujo YF-S201 se fundamenta en la medición de las revoluciones que da una hélice instalada en su interior. Está basado en un sensor magnético de efecto *Hall*, lo que permite contabilizar los pulsos de salida del medidor, relacionando de este modo, al flujo establecido en la tubería con la frecuencia de la onda de salida que emite el sensor. Cada pulso equivale aproximadamente 2.25 ml. Este sensor tiene una precisión aproximada del 10% para cualquier condición de operación, para lograr una precisión aceptable, es necesario realizar una calibración adecuada bajo las condiciones propias del sistema hidráulico.

Figura 66. Sensor de Flujo YF-S401 (4.5 ml/s – 100 ml/s)



A continuación se presentan algunas de las características técnicas del sensor (HeTPro, 2014):

Modelo: YF-S201  
Tipo de sensor: Hall effect  
Voltaje de funcionamiento: 5 a 18 V DC  
Max consumo de corriente: 15 mA a 5 V  
Tipo de salida: 5V TTL  
Trabajo Caudal: de 1 a 30 litros / minuto  
Temperatura de funcionamiento: -25 a 80 °C  
Humedad de trabajo Rango: 35% -80% de humedad relativa  
Precisión: ± 2%  
Rango de flujo: 1-30 L/min  
Presión máxima del agua: 2,0 MPa  
Ciclo de trabajo de la salida: 50% + 10%  
Tiempo de subida de la salida: 0.04us  
Tiempo de caída de la salida: 0.18us  
Velocidad de flujo características del pulso:  
Frecuencia (Hz) = 7,5 \* Caudal (L / min)  
Pulsos por litro: 450  
Durabilidad: un mínimo de 300.000 ciclos  
Longitud del cable: 15 cm  
1/2 "conexiones nominales de tubería, 0.78" de diámetro exterior, 1/2" de la rosca. Tamaño: 2.5 "x 1.4" x 1.4.

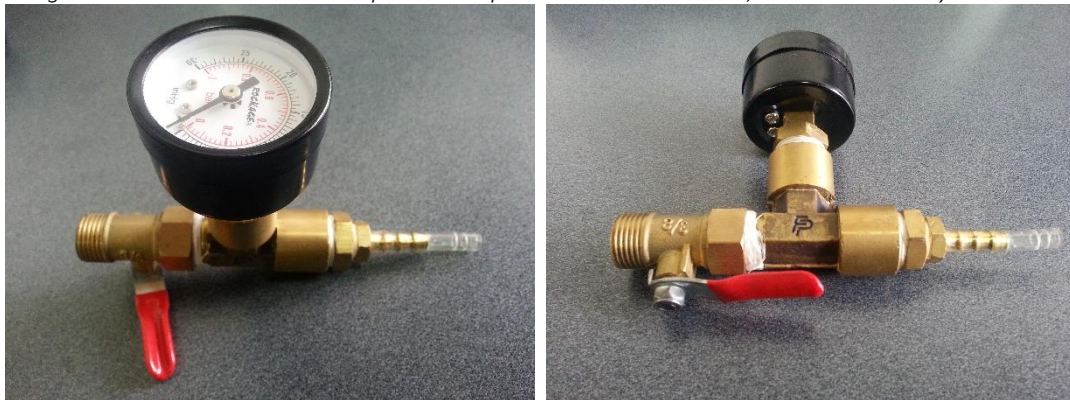
El caudal de salida de la columna se mide usando el método gravimétrico con ayuda de un sensor de presión puesto en un tanque de recolección. Este sistema permite conocer el peso, o el volumen de salida, en función del tiempo. Es necesario calibrar adecuadamente el sensor en función del volumen de recolección.

#### 4.8. CALIBRACIÓN DE TENSÍOMETROS

El proceso de calibración de los tensiómetros es un tanto complejo por el equipo necesario para lograr y aprovechar la precisión del transductor de presión. Este proceso se puede realizar utilizando una bomba de vacío con válvula de regulación de la presión, este procedimiento puede dar como resultado valores apropiados en el rango de presión de los sensores utilizados.

Para la medida de la presión se utiliza un vacuómetro debidamente calibrado, se realiza el acople de los sensores a través de una unión tee racor de cierre rápido, y utilizando el mismo montaje que se definió anteriormente para los tensiómetros, este montaje se puede ver en Figura 67.

*Figura 67. Accesorio Construido para el Acople Entre el Vacuómetro, Bomba de Vacío y Sensores*



Para la calibración de los sensores se utiliza una bomba de vacío conectada a un medidor análogo, con un rango que va desde los 0 Kpa hasta 100 Kpa, se toman cinco puntos entre 0 y 50 Kpa, y cinco puntos entre 50 y 100 Kpa, posteriormente, se ajustan los datos medidos a una regresión lineal que caracteriza el sensor y resulta en la calibración del mismo, este proceso se debe hacer para cada sensor, se anota también la temperatura en cada medición, con el fin de realizar correcciones por temperatura si es el caso, este tipo de calibración se ha utilizado en diversos trabajos investigativos, (Salas García, 2012).

Básicamente, el proceso de calibración consiste en generar una presión de succión con ayuda de la bomba de vacío, una vez verificada la hermeticidad del sistema, se opera la válvula para generar diferentes presiones de succión. Se debe anotar el valor correspondiente del voltaje que emite el sensor y el valor de la presión de succión en pulgadas de mercurio o en Kpa, finalmente se crea una función que relacione el valor del voltaje con la presión de succión, estos resultados se muestran en la Gráfica 1 y Tabla 25.

Gráfica 1. Resultado de la Calibración de Tensiómetros

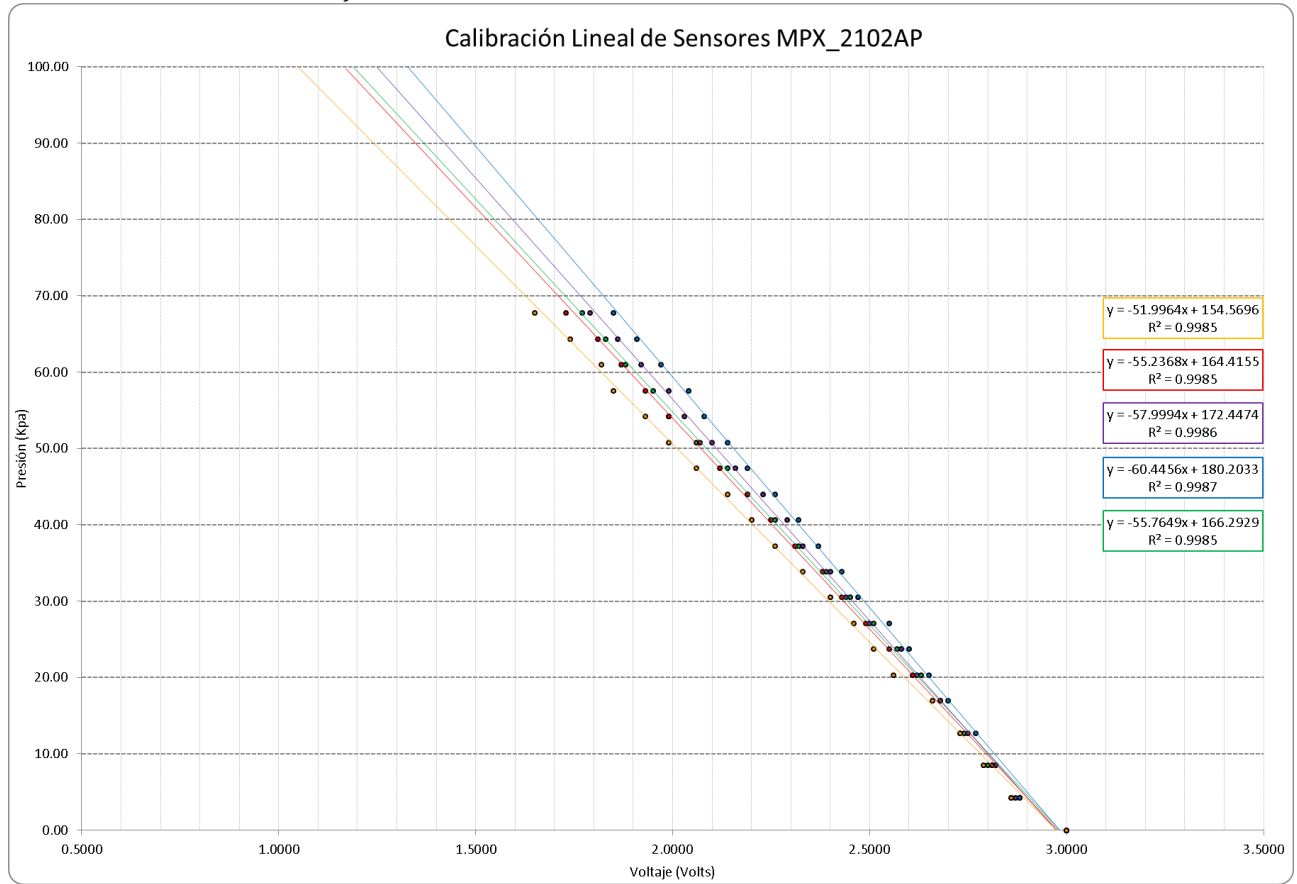


Tabla 25. Calibración de los Sensores de Presión MPX\_2102AP

Calibración Lineal de Sensores MPX_2102AP							
Dato	Sensor ID:		T1	T2	T3	T4	T5
	PRESIÓN DE SUCCIÓN MEDIA (in Hg)	PRESIÓN DE SUCCIÓN MEDIA (Kpa)	VOLTAJE MEDIO (V) T1	VOLTAJE MEDIO (V) T2	VOLTAJE MEDIO (V) T3	VOLTAJE MEDIO (V) T4	VOLTAJE MEDIO (V) T5
1	20	67.73	1.7700	1.8500	1.7900	1.7300	1.6500
2	19	64.34	1.8300	1.9100	1.8600	1.8100	1.7400
3	18	60.95	1.8800	1.9700	1.9200	1.8700	1.8200
4	17	57.57	1.9500	2.0400	1.9900	1.9300	1.8500
5	16	54.18	1.9900	2.0800	2.0300	1.9900	1.9300
6	15	50.80	2.0600	2.1400	2.1000	2.0700	1.9900
7	14	47.41	2.1400	2.1900	2.1600	2.1200	2.0600
8	13	44.02	2.1900	2.2600	2.2300	2.1900	2.1400
9	12	40.64	2.2600	2.3200	2.2900	2.2500	2.2000
10	11	37.25	2.3200	2.3700	2.3300	2.3100	2.2600
11	10	33.86	2.3900	2.4300	2.4000	2.3800	2.3300
12	9	30.48	2.4500	2.4700	2.4400	2.4300	2.4000
13	8	27.09	2.5100	2.5500	2.5000	2.4900	2.4600
14	7	23.70	2.5700	2.6000	2.5800	2.5500	2.5100
15	6	20.32	2.6300	2.6500	2.6200	2.6100	2.5600
16	5	16.93	2.6800	2.7000	2.6800	2.6800	2.6600
17	3.75	12.70	2.7400	2.7700	2.7500	2.7300	2.7300
18	2.5	8.47	2.8000	2.8200	2.8100	2.8100	2.7900
19	1.25	4.23	2.8800	2.8800	2.8700	2.8600	2.8600
20	0	0.00	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000	3.0000

#### 4.8.1. Llenado y Verificación del Funcionamiento de los Tensiómetros

Es importante tener en cuenta que los tensiómetros deben llenarse con agua destilada, preferiblemente des-aireada, y siempre se debe verificar que no haya burbujas de aire atrapadas en el interior del tensiómetro. El proceso de llenado es el siguiente:

En un recipiente que contenga agua destilada se introducen los tensiómetros, posteriormente se genera una presión de succión en la parte superior del tensiómetro, para esto es útil usar una jeringa, de este modo se logra que, gracias a la presión de succión, se inicie el proceso de llenado a través de la cápsula porosa lo que garantiza que se incluya la menor cantidad de aire posible. A medida que se realiza el llenado del tensiómetro la presión en la jeringa disminuye, es necesario repetir el proceso hasta que en la jeringa se acumule el agua que viene desde la cápsula porosa. Una vez se llene completamente el tensiómetro se debe instalar en el dispositivo de prueba (Figura 68) teniendo cuidado de evacuar todo el aire que este pueda contener. Se genera nuevamente una presión de succión con la jeringa, y se golpea el tensiómetro cuidadosamente, bien sea con una barra de goma u otro elemento que esté conformado por un material elástico, con el fin de evacuar todas

las posibles burbujas de aire atrapadas. Posteriormente, se debe dejar el tensiómetro sumergido en agua destilada como mínimo por 24 horas y finalmente instalar el sensor con el acople rápido en la columna de suelo.

Nota: El dispositivo para la prueba y verificación de los tensiómetros se construye con un trozo de tubo de una pulgada de diámetro, una unión dreaser, un buje para el cambio de diámetro a 1/2" y el acople respectivo para la manguera de 6 mm. en uno de los extremos se acopla el tensiómetro y en el otro se puede acoplar una bomba de vacío o una jeringa para la prueba del tensiómetro y de su respectivo sensor.

Figura 68. Proceso de Llenado de Tensiómetros



#### 4.9. CALIBRACIÓN DE LOS SENSORES PARA LA MEDICIÓN DEL CONTENIDO VOLUMÉTRICO DE AGUA

La calibración de los medidores del contenido volumétrico de agua puede realizarse de dos modos: continuo y discreto. Se decide realizar la calibración de todos los medidores de manera discreta, pero, se realiza un ensayo continuo con una duración aprox. de 10 días, para establecer el comportamiento de los sensores, los materiales y la confiabilidad en la lectura.

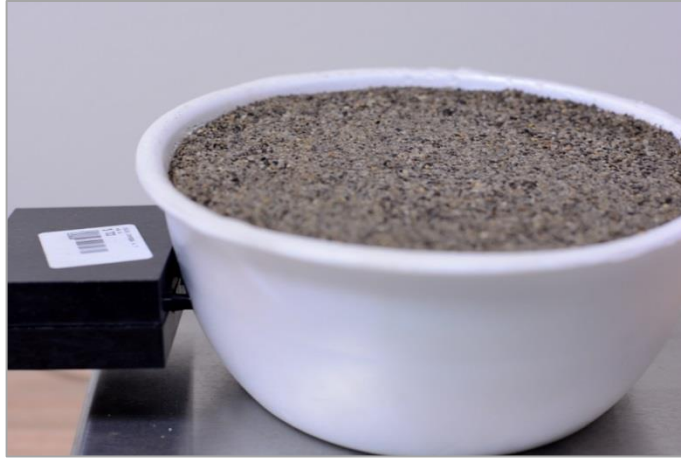
##### 4.9.1. Método Continuo:

Para evaluar el comportamiento del sensor que mide la humedad, se parte de una muestra de suelo seco (USDA, 2009), en esta experiencia se utiliza un recipiente con un volumen de  $690 \text{ cm}^3$  que se llena con el suelo (arena), Figura 69, con ayuda de la interface en Lab View (Figura 70) se captura la lectura del sensor para esta condición inicial; en este caso corresponde a 4.9588 V. En el mismo instante se registra el peso de la muestra a través de una balanza con 0.1 g de precisión las mediciones de esta se capturan directamente en el computador.

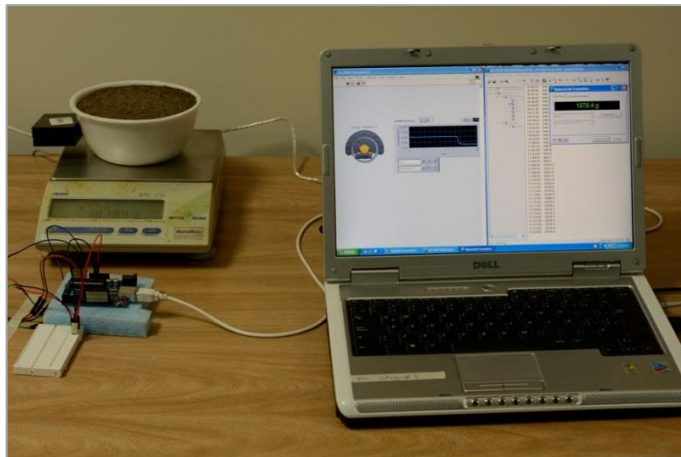


Este registro permite conocer en cada instante el contenido volumétrico de agua en la muestra de suelo, se capturan valores en un intervalo de 1 min por un periodo de 10 días hasta lograr el desecamiento de la muestra.

*Figura 69. Muestra de Suelo Para el Monitoreo de la Humedad*

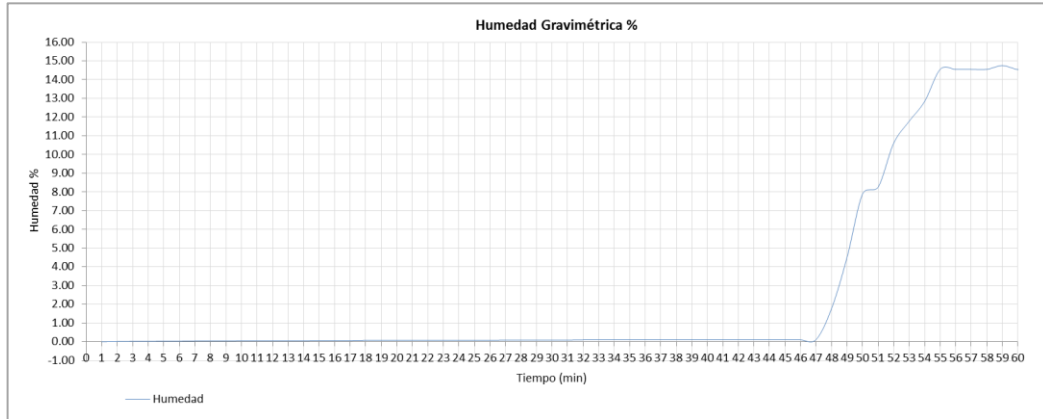


*Figura 70. Montaje para la Captura de Datos.*



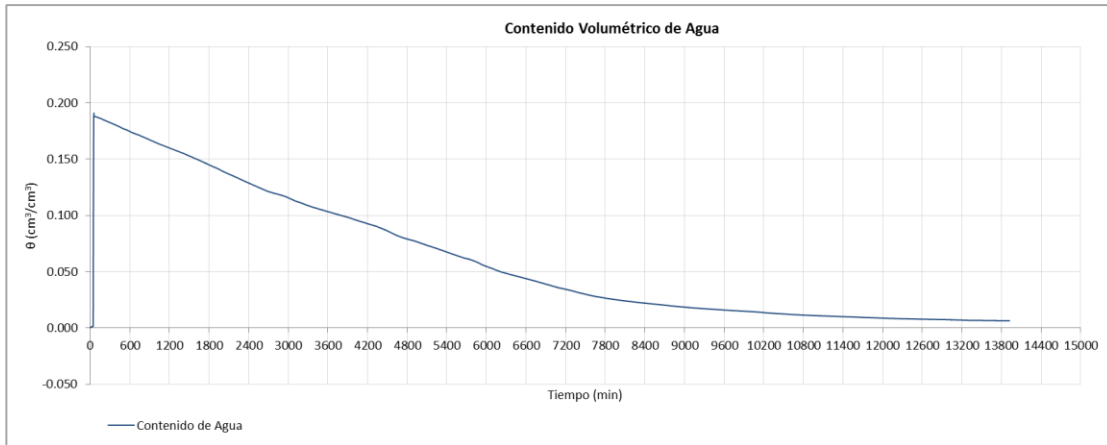
Luego de tener las primeras lecturas y verificar que son estables se agrega agua con ayuda de un atomizador, hasta alcanzar como primera medida una humedad cercana al 15%, esto se puede apreciar en la Gráfica 2. Este valor corresponde a un volumen de agua agregado de 129.6 g. alcanzando una humedad en la muestra del 14.8%.

Gráfica 2. Comportamiento de la Adición de Agua a la Muestra

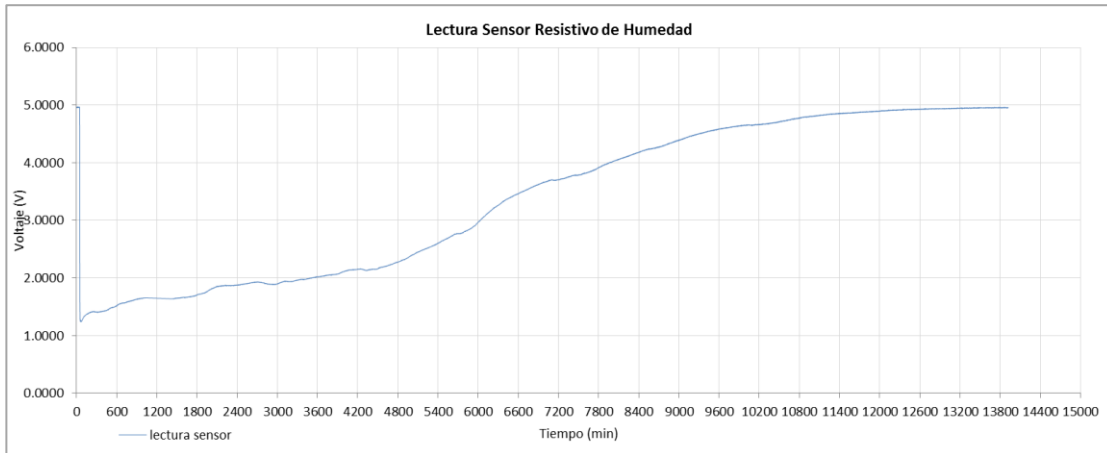


La adición de agua se realiza aproximadamente en un intervalo de 13 minutos, y el secado hasta el 0.49% de humedad gravimétrica, bajo condiciones ambientales, se logra en 10 días.

Gráfica 3. Curva de Deseccación de la Muestra de Suelo de Prueba

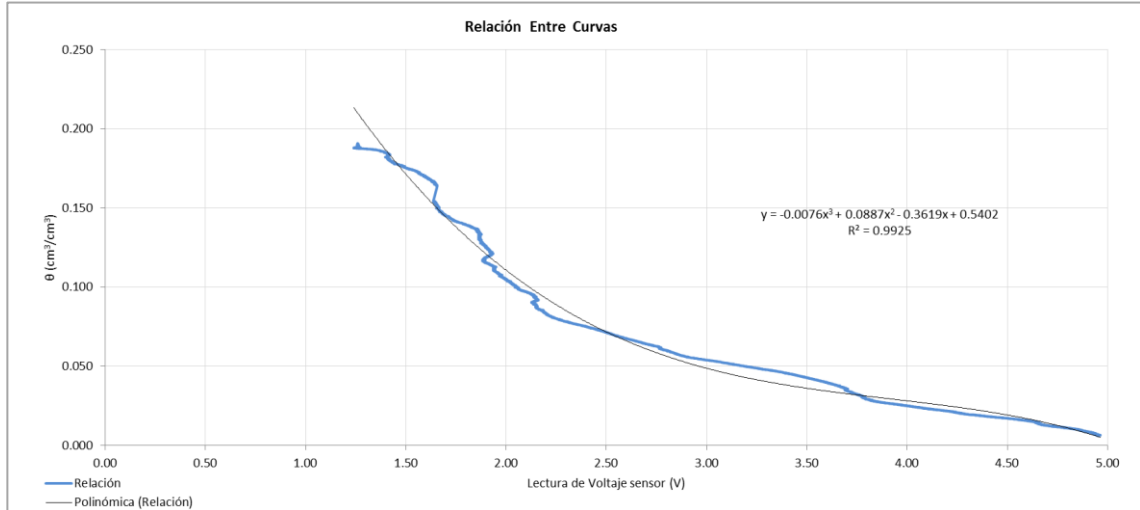


Gráfica 4. Lectura de Voltaje del Sensor de Humedad en el Suelo



Para establecer una relación entre los valores que muestra el sensor y el contenido volumétrico de agua se disponen en un plano coordenado y se ajustan a un polinomio de grado 3, comparativamente con lo propuesto por (Hincapié Gómez, 2011).

Gráfica 5. Relación Entre el Voltaje y el Contenido Volumétrico de Agua



#### 4.9.2. Método Discreto:

La calibración de sensores de humedad por múltiples puntos consiste en registrar los valores de voltaje que emite el sensor para un punto conocido del contenido volumétrico de agua, posteriormente, se pueden relacionar y ajustar con un polinomio. Finalmente, con la relación entre las variables se obtiene la ecuación de calibración del sensor para el suelo de estudio.

La calibración puntual se puede realizar siguiendo el siguiente proceso:

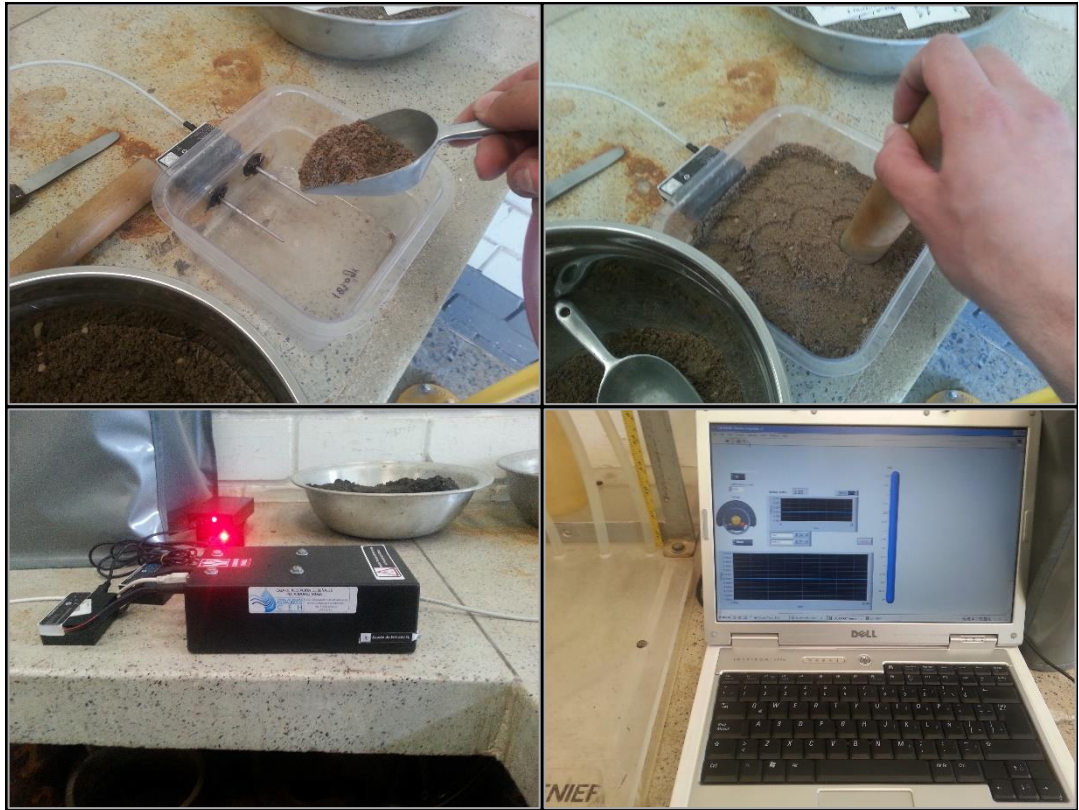
1. Tamizar el suelo de tal modo que el máximo grano no supere los 5 mm.
2. Preparar por lo menos 10 muestras de suelo seco, secado al horno a 105 °c por 24 horas (USDA, 2009), en recipientes tales que se tenga una cobertura mínima de 3 cm alrededor de los electrodos desnudos, el suelo debe estar debidamente gradado. Los recipientes deben estar contruidos con un material no conductor, deben ser lo suficientemente rígidos.
3. Pesar las 10 muestras y el recipiente (Peso del suelo seco).
4. Conectar el sensor al PCL Arduino e iniciar la captura de datos en Lab View.
5. Verter una capa, aproximadamente de 3 cm de espesor, en la base del recipiente e insertar el electrodo sobre este manto de suelo. El electrodo debe estar en posición horizontal, se debe apisonar la tierra, alrededor del electrodo, finalmente, rellenar con otro manto de 3 cm sobre el electrodo.
6. Se debe presionar uniformemente todo el suelo, en especial sobre el electrodo, por lo menos se deben hacer cinco pasadas de apisonamiento para lograr una compactación uniforme, preferiblemente compactar con el puño cerrado o con ayuda de un compactador manual.

7. Anotar el valor de voltaje que arroja la interface en Lab View para las condiciones de suelo seco, este valor representa un contenido volumétrico de agua del 0%.
8. Calcular el volumen del suelo seco ordenado: hacer una marca en el límite superior del suelo para calcular el volumen con una probeta graduada usando agua, referiblemente usar un recipiente graduado.
9. Retirar el sensor y dejarlo en una superficie no conductora. El sensor debe estar conectado siempre sin interrupciones durante el muestreo de las 10 probetas.
10. Alistar 5% del volumen de suelo de agua limpia, o un volumen de agua que logre un aumento del 2 al 10 % (recomendación de 2.5% de aumento hasta alcanzar el contenido volumétrico correspondiente a la saturación)
11. Agregar el agua a la muestra de suelo, Sin perder masa de suelo ni de agua, mezclar muy bien el agua con el suelo, agregar con el *spray* de tal modo que la muestra quede uniforme, evitar la formación de grumos, mezclar bien con una espátula u otro elemento, verificara el peso de la muestra.
12. Coloque el sensor en la muestra como se indica en el paso 5 y 6.
13. Anotar el voltaje que mide el sensor de 10 a 60 segundos cada segundo y estimar el promedio de la serie. Ese valor corresponde al valor que mide el sensor para la humedad calculada.
14. Verificar que el peso permanezca constante, retirar el medidor y anotar el peso del recipiente con el suelo húmedo, realizar la corrección en el contenido volumétrico de agua, si se ha perdido masa de agua.
15. Repetir el proceso para por lo menos 10 contenidos volumétricos de agua diferentes.
16. Con los datos calcular la curva de calibración del aparato graficando el voltaje vs. el contenido volumétrico de agua, hallar la ecuación de ajuste y parámetros estadísticos.

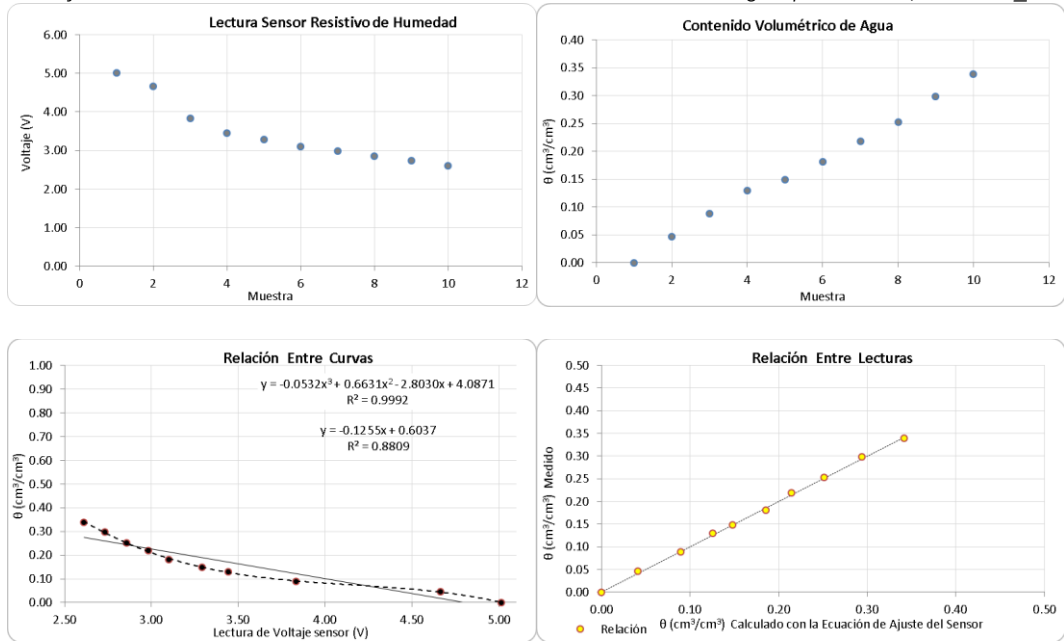
En el proceso de calibración es importante que se mantenga la masa inicial de suelo seco, es recomendable también que se escoja un aumento del contenido de humedad gravimétrico del 2.5%, la lectura del sensor es sumamente precisa para valores alejados del punto de saturación, una vez se logra la saturación, o se está próxima a esta, el sensor comienza a registrar el mismo valor para un amento en el contenido volumétrico de agua. Los resultados de la calibración se pueden apreciar en la Gráfica 6 y Gráfica 7.

Figura 71. Proceso de Calibración Puntual de Higrómetros

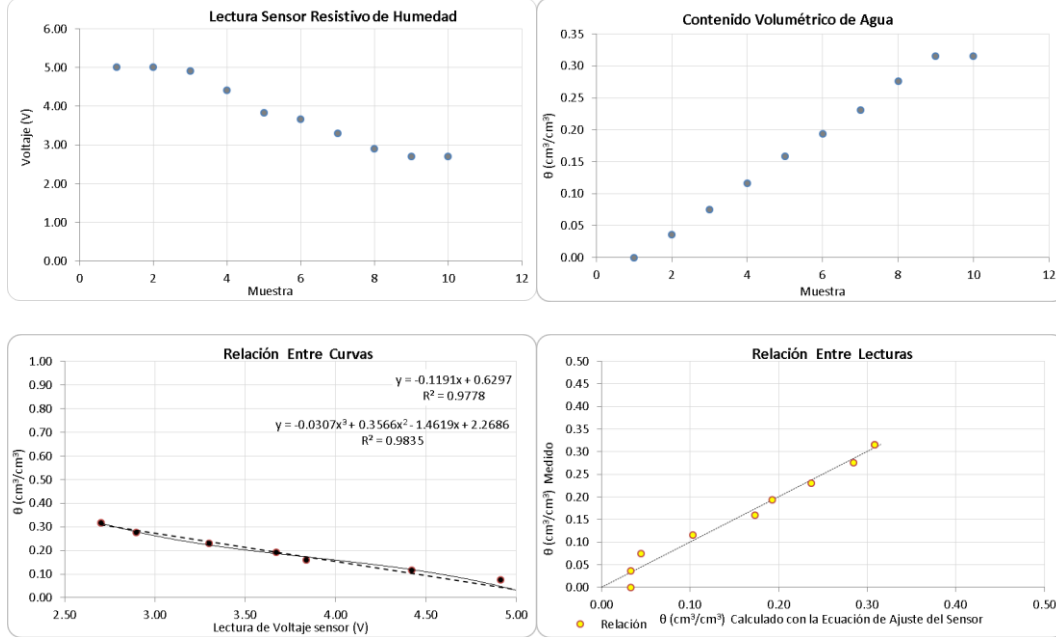




Gráfica 6. Calibración de Medidores de Contenido Volumétrico de Agua para Arena, Sensor  $\theta_1$



Gráfica 7. Calibración de Medidores de Contenido Volumétrico de Agua Para el Suelo de Plantación  $\theta_2$



En la Tabla 26 se muestra el detalle del cálculo necesario para la estimación del contenido volumétrico de agua a partir de la humedad gravimétrica y la respectiva ecuación de calibración para el sensor  $\theta_1$ . Algunos aspectos importantes a considerar es el voltaje de entrada en la fuente. Este valor de voltaje define el valor cero de la calibración, es decir, se debe realizar el ajuste necesario, sumando o restando el voltaje específico registrado en la toma de datos con el fin de ajustar los valores medidos al cero de calibración. Se encontró que los sensores reaccionan a partir de un 2 % de humedad gravimétrica.

Tabla 26. Calibración Sensor Resistivo  $\theta_1$

Fecha 02-05-14	Medidor: $\theta_1$	1	Peso de agua a agregar para un aumento del 2.5 % en humedad:	Peso de agua a agregar para un aumento del 10 % en humedad:	Voltaje en la fuente:	Peso del medidor solo	Volumen total de recipiente hasta el borde cm <sup>3</sup> :
	Suelo: Arena	R_2	61.70	246.79	5.14	37.8	2150

Tiempo de Lectura		Lectura	Recipiente Con Tapa (tapa=78 g)	Recipiente con Tapa + Suelo Seco:	Volumen suelo seco:	Recipiente + Suelo Seco+Agua:	Voltaje medio para 1' medidor:	Temperatura:	Densidad agua:	Peso Suelo Seco:
Inicial	Final		gr	gr	cm <sup>3</sup>	gr	Vol.	°C	g/cm <sup>3</sup>	gr
10	20	1	264.9	2732.8	1480	2732.8	5.013	18	0.99868	2467.90
260	300	2	264.9	2732.8	1480	2801.4	4.663	18	0.99868	2467.90
320	350	3	264.9	2732.8	1480	2863.5	3.832	18	0.99868	2467.90
390	440	4	264.9	2732.8	1480	2924.3	3.443	18	0.99868	2467.90
460	500	5	264.9	2732.8	1480	2953	3.290	18	0.99868	2467.90
510	540	6	264.9	2732.8	1480	3000.8	3.100	18	0.99868	2467.90
590	620	7	264.9	2732.8	1480	3055.6	2.983	18	0.99868	2467.90
650	680	8	264.9	2732.8	1480	3106.5	2.856	18	0.99868	2467.90

Tiempo de Lectura		Lectura	Recipiente Con Tapa (tapa=78 g)	Recipiente con Tapa + Suelo Seco:	Volumen suelo seco:	Recipiente + Suelo Seco+Agua:	Voltaje medio para 1' medidor:	Temperatura:	Densidad agua:	Peso Suelo Seco:
Inicial	Final		gr	gr	cm <sup>3</sup>	gr	Vol.	°C	g/cm <sup>3</sup>	gr
700	720	9	264.9	2732.8	1480	3174.1	2.731	18	0.99868	2467.90
725	735	10	264.9	2732.8	1480	3233.8	2.611	18	0.99868	2467.90

Peso de Agua Agregada:	Volumen de agua:	Contenido Gravimétrico de agua:	Humedad Gravimétrica:	Densidad Aparente /Seca:	Humedad Volumétrica calculada con da	Contenido volumétrico de agua:	Contenido volumétrico de agua calculado:
gr	cm <sup>3</sup>	gr/gr	%	g/cm <sup>3</sup>	%	cm/cm	cm/cm
0.00	0.00	0.00	0.00	1.67	0.00	0.0000	0.0000
68.60	68.69	0.03	2.78	1.67	4.64	0.0464	0.0409
130.70	130.87	0.05	5.30	1.67	8.83	0.0884	0.0895
191.50	191.75	0.08	7.76	1.67	12.94	0.1296	0.1257
220.20	220.49	0.09	8.92	1.67	14.88	0.1490	0.1481
268.00	268.35	0.11	10.86	1.67	18.11	0.1813	0.1853
322.80	323.23	0.13	13.08	1.67	21.81	0.2184	0.2141
373.70	374.19	0.15	15.14	1.67	25.25	0.2528	0.2511
441.30	441.88	0.18	17.88	1.67	29.82	0.2986	0.2942
501.00	501.66	0.20	20.30	1.67	33.85	0.3390	0.3420

Tabla 27. Calibración Sensor Resistivo  $\theta_2$

02-05-14	Medidor:	2	1	Peso de agua a agregar para un aumento del 2.5 % en humedad:	Peso de agua a agregar para un aumento del 10 % en humedad:	Voltaje en la fuente:	Peso del medidor solo:	Volumen total de recipiente hasta el borde:
	Suelo:	suelo de plantación	R_2	58.20	232.8	5.14	37.8	2150

Tiempo de Lectura		Lectura	Recipiente Con Tapa (tapa=78 g)	Recipiente con Tapa + Suelo Seco:	Volumen suelo seco:	Recipiente + Suelo Seco+Agua:	Voltaje medio para 1' medidor:	Temperatura:	Densidad agua:	Peso Suelo Seco:
Inicial	Final		gr	gr	cm <sup>3</sup>	gr	Vol.	°C	g/cm <sup>3</sup>	gr
10	20	1	264.9	2592.9	1600	2592.9	5.013	19	0.9985	2328.00
50	100	2	264.9	2592.9	1600	2650.6	5.013	19	0.9985	2328.00
110	130	3	264.9	2592.9	1600	2712.9	4.913	19	0.9985	2328.00
160	200	4	264.9	2592.9	1600	2778.1	4.420	19	0.9985	2328.00
210	250	5	264.9	2592.9	1600	2846.9	3.837	19	0.9985	2328.00
320	380	6	264.9	2592.9	1600	2901.6	3.672	19	0.9985	2328.00
430	480	7	264.9	2592.9	1600	2961.4	3.299	19	0.9985	2328.00
530	560	8	264.9	2592.9	1600	3033.6	2.897	19	0.9985	2328.00



Tiempo de Lectura		Lectura	Recipiente Con Tapa (tapa=78 g)	Recipiente con Tapa + Suelo Seco:	Volumen suelo seco:	Recipiente + Suelo Seco+Agua:	Voltaje medio para 1' medidor:	Temperatura:	Densidad agua:	Peso Suelo Seco:
Inicial	Final		gr	gr	cm <sup>3</sup>	gr	Vol.	°C	g/cm <sup>3</sup>	gr
620	650	9	264.9	2592.9	1600	3097.1	2.700	19	0.9985	2328.00
620	650	10	264.9	2592.9	1600	3097.1	2.700	19	0.9985	2328.00

Peso de Agua Agregada:	Volumen de agua:	Contenido Gravimétrico de agua:	Humedad Gravimétrica:	Densidad Aparente /Seca:	Humedad Volumétrica calculada con da	Contenido volumétrico de agua:	Contenido volumétrico de agua calculado:
gr	cm <sup>3</sup>	gr/gr	%	g/cm <sup>3</sup>	%	cm/cm	cm/cm
0.00	0.00	0.00	0.00	1.46	0.00	0.0000	0.0328
57.70	57.79	0.02	2.48	1.46	3.61	0.0361	0.0328
120.00	120.18	0.05	5.15	1.46	7.50	0.0751	0.0447
185.20	185.48	0.08	7.96	1.46	11.58	0.1159	0.1034
254.00	254.38	0.11	10.91	1.46	15.88	0.1590	0.1729
308.70	309.17	0.13	13.26	1.46	19.29	0.1932	0.1925
368.50	369.06	0.16	15.83	1.46	23.03	0.2307	0.2369
440.70	441.37	0.19	18.93	1.46	27.54	0.2759	0.2848
504.20	504.96	0.22	21.66	1.46	31.51	0.3156	0.3082
504.20	504.96	0.22	21.66	1.46	31.51	0.3156	0.3082

Tabla 28. Calibración Sensor Resistivo  $\theta_3$

02-05-14	Medidor:	3	1	Peso de agua a agregar para un aumento del 2.5 % en humedad:	Peso de agua a agregar para un aumento del 10 % en humedad:	Voltaje en la fuente:	Peso del medidor solo	Volumen total de recipiente hasta el borde:
	Suelo:	suelo de plantación	R_3	54.61	218.43	5.14	37.8	2150

Tiempo de Lectura		Lectura	Recipiente Con Tapa (tapa=78 g)	Recipiente con Tapa + Suelo Seco:	Volumen suelo seco:	Recipiente + Suelo Seco+Agua:	Voltaje medio para 1' medidor:	Temperatura:	Densidad agua:	Peso Suelo Seco:
Inicial	Final		gr	gr	cm <sup>3</sup>	gr	Vol.	°C	g/cm <sup>3</sup>	gr
30	100	1	264.9	2449.2	1500	2449.2	5.013	19	0.9985	2184.30
120	130	2	264.9	2449.2	1500	2504.6	5.013	19	0.9985	2184.30
190	230	3	264.9	2449.2	1500	2558.8	4.800	19	0.9985	2184.30
285	300	4	264.9	2449.2	1500	2611.7	4.427	19	0.9985	2184.30
360	400	5	264.9	2449.2	1500	2667.4	3.985	19	0.9985	2184.30
420	460	6	264.9	2449.2	1500	2722.7	3.696	19	0.9985	2184.30

Tiempo de Lectura		Lectura	Recipiente Con Tapa (tapa=78 g)	Recipiente con Tapa + Suelo Seco:	Volumen suelo seco:	Recipiente + Suelo Seco+Agua:	Voltaje medio para 1' medidor:	Temperatura:	Densidad agua:	Peso Suelo Seco:
Inicial	Final		gr	gr	cm <sup>3</sup>	gr	Vol.	°C	g/cm <sup>3</sup>	gr
490	520	7	264.9	2449.2	1500	2776.1	3.367	19	0.9985	2184.30
575	620	8	264.9	2449.2	1500	2830.6	3.090	19	0.9985	2184.30
660	690	9	264.9	2449.2	1500	2883.9	2.801	19	0.9985	2184.30
750	760	10	264.9	2449.2	1500	2921.9	2.775	19	0.9985	2184.30

Peso de Agua Agregada:	Volumen de agua:	Contenido Gravimétrico de agua:	Humedad Gravimétrica:	Densidad Aparente /Seca:	Humedad Volumétrica calculada con da	Contenido volumétrico de agua:	Contenido volumétrico de agua calculado:
gr	cm <sup>3</sup>	gr/gr	%	g/cm <sup>3</sup>	%	cm/cm	cm/cm
0.00	0.00	0.00	0.00	1.46	0.00	0.0000	0.0273
55.40	55.48	0.03	2.54	1.46	3.69	0.0370	0.0273
109.60	109.77	0.05	5.02	1.46	7.31	0.0732	0.0531
162.50	162.75	0.07	7.44	1.46	10.83	0.1085	0.0982
218.20	218.53	0.10	9.99	1.46	14.55	0.1457	0.1519
273.50	273.91	0.13	12.52	1.46	18.23	0.1826	0.1869
326.90	327.39	0.15	14.97	1.46	21.79	0.2183	0.2268
381.40	381.98	0.17	17.46	1.46	25.43	0.2547	0.2603
434.70	435.36	0.20	19.90	1.46	28.98	0.2902	0.2954
472.70	473.41	0.22	21.64	1.46	31.51	0.3156	0.2985

Tabla 29. Calibración Sensor Resistivo  $\theta_4$  y  $\theta_5$

Estimación de ecuación para Theta 04 y 05 a Partir de Theta 02						
Medidor ID	Ecuación Base		Corrección Ecuación		Ecuación Estimada	
	Pendiente	Intercepto	Pendiente	Intercepto	Pendiente	Intercepto
theta 02	-0.11907262	0.62969899	1	1	-0.11907262	0.62969899
theta 04			1.02364574	1.01686943	-0.12188818	0.64032165
theta 05			1.01906672	1.0135417	-0.12134294	0.63822618

#### 4.10. CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE TEMPERATURA

Según el fabricante (Texas Instruments, 2013) el sensor está debidamente calibrado, donde 10 mv representan 1 °C, sin embargo, dadas las condiciones constructivas de la termo-cupla, se verifica comparado la lecturas del sensor con las dadas por un termómetro de mercurio de precisión.

El proceso de calibración consiste en registrar por lo menos 10 temperaturas cercanas a los valores tradicionales que se pueden encontrar en el suelo en condiciones ambientales para la ciudad de Bogotá, para lograrlo se disponen recipientes con agua a diferentes temperaturas. Se registra el valor de voltaje que emite

el sensor vs. el valor medido de temperatura que registra el termómetro de mercurio, en la Tabla 27 y en la Gráfica 8 se puede apreciar el resultado final de este proceso.

Gráfica 8. Calibración del Sensor de Temperatura (LM-45)

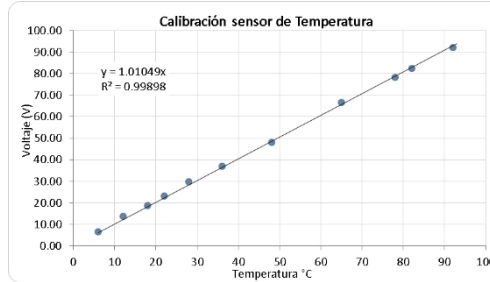


Tabla 30. Calibración del Sensor de Temperatura (LM-45).

Id	Valor medio de Voltaje	lectura Termómetro	Ecuación de Ajuste
0	6.65	6	6.72
1	13.69	12	13.83
2	18.78	18	18.98
3	23.30	22	23.54
4	29.69	28	30.00
5	37.04	36	37.43
6	48.00	48	48.50
7	66.69	65	67.39
8	78.39	78	79.21
9	82.39	82	83.25
10	92.00	92	92.97

#### 4.11. CALIBRACIÓN DE MEDIDORES DE CAUDALES

El sensor para la medición del caudal de entrada puede presentar un error hasta del 10% (HeTPro, 2014), para mejorar la precisión en la lectura, es necesario calibrarlo. Una vez instalado el sensor en el sistema hidráulico de alimentación, se hacen circular caudales dentro del rango de medición, la medición de caudales se realiza con el método gravimétrico registrando el peso del líquido y la temperatura respectiva. De este modo, es posible relacionar lectura del sensor con el caudal que circula; se relaciona el número de vueltas que el sensor registra para un determinado caudal, posteriormente, se calcula el volumen desplazado para una vuelta, con lo cual se puede estimar el volumen que circula por unidad de tiempo, los resultados se resumen en la Tabla 31, la expresión para el cálculo de caudal se muestra en la ecuación (12):

$$Q_e = kn \tag{12}$$

Tabla 31. Calibración del Medido de Caudal de Entrada

Densidad agua (18°): 998.68 Kg/m<sup>3</sup>

Dato	Peso g.	Volumen ml.	Tiempo seg.	# Vueltas (N) 1/3 seg.	# Vueltas (n) 1/ seg.	Caudal ml/s	Volumen ml 1 seg.	Constante (K) seg./seg.
1	233.2	233.51	14.7	14	4.7	15.88	15.88	3.40
2	265.6	265.95	17.09	13	4.3	15.56	15.56	3.59
3	281.1	281.47	18.09	13	4.3	15.56	15.56	3.59

Densidad agua (18°): 998.68 Kg/m<sup>3</sup>

Dato	Peso	Volumen	Tiempo	# Vueltas (N)	# Vueltas (n)	Caudal	Volumen	Constante (K)
	g.	ml.	seg.	1/3 seg.	1/ seg.	ml/s	ml 1 seg.	seg./seg.
4	325	325.43	15.56	21	7.0	20.91	20.91	2.99
5	358.8	359.27	17.21	21	7.0	20.88	20.88	2.98
6	189.2	189.45	9.09	21	7.0	20.84	20.84	2.98
7	308.6	309.01	9.41	20	6.7	32.84	32.84	4.93
8	278.5	278.87	8.27	19	6.3	33.72	33.72	5.32
9	341.1	341.55	10.2	19	6.3	33.49	33.49	5.29
10	335.6	336.04	9.15	16	5.3	36.73	36.73	6.89
11	158.8	159.01	4.32	16	5.3	36.81	36.81	6.90
12	276.7	277.07	7.59	16	5.3	36.50	36.50	6.84
13	201.2	201.47	7.88	26	8.7	25.57	25.57	2.95
14	433.6	434.17	17.04	25	8.3	25.48	25.48	3.06
15	166.9	167.12	6.61	26	8.7	25.28	25.28	2.92
16	163.8	164.02	7.3	23	7.7	22.47	22.47	2.93
17	172.4	172.63	7.81	23	7.7	22.10	22.10	2.88
18	254.3	254.64	11.74	23	7.7	21.69	21.69	2.83
19	172.5	172.73	10.38	15	5.0	16.64	16.64	3.33
20	227.7	228.00	13.94	16	5.3	16.36	16.36	3.07
21	124.9	125.07	7.53	15	5.0	16.61	16.61	3.32
22	134.9	135.08	11.49	10	3.3	11.76	11.76	3.53
23	176.4	176.63	14.81	11	3.7	11.93	11.93	3.25
24	257.4	257.74	21.95	11	3.7	11.74	11.74	3.20
25	129.1	129.27	7.81	15	5.0	16.55	16.55	3.31
26	251.7	252.03	15.57	15	5.0	16.19	16.19	3.24
27	185.9	186.15	11.43	15	5.0	16.29	16.29	3.26
28	252.3	252.63	7.22	17	5.7	34.99	34.99	6.17
29	169.5	169.72	4.82	18	6.0	35.21	35.21	5.87
30	190.6	190.85	5.39	17	5.7	35.41	35.41	6.25
								4.036

Dato	Peso	Volumen	Tiempo	# Vueltas (N)	# Vueltas (n)	Caudal	Volumen	Constante (K)
	g.	ml.	seg.	1/3 seg.	1/ seg.	ml/s	ml 1 seg.	seg./seg.
1	223	223.29	14.58	15	5.0	15.32	15.32	3.06
2	297	297.39	19.42	15	5.0	15.31	15.31	3.06
3	132	132.17	8.59	15	5.0	15.39	15.39	3.08
4	115	115.15	7.51	15	5.0	15.33	15.33	3.07
5	139	139.18	9.67	15	5.0	14.39	14.39	2.88
6	266	266.35	18.49	15	5.0	14.41	14.41	2.88

Dato	Peso	Volumen	Tiempo	# Vueltas (N)	# Vueltas (n)	Caudal	Volumen	Constante (K)
	g.	ml.	seg.	1/3 seg.	1/ seg.	ml/s	ml 1 seg.	seg./seg.
7	157	157.21	10.74	15	5.0	14.64	14.64	2.93
8	262	262.35	17.97	15	5.0	14.60	14.60	2.92
9	102	102.13	6.99	15	5.0	14.61	14.61	2.92
10	384	384.51	26.66	15	5.0	14.42	14.42	2.88
11	136	136.18	9.46	15	5.0	14.40	14.40	2.88
12	223	223.29	15.62	15	5.0	14.30	14.30	2.86
13	124	124.16	8.81	15	5.0	14.09	14.09	2.82
14	140	140.19	9.85	15	5.0	14.23	14.23	2.85
15	194	194.26	13.49	15	5.0	14.40	14.40	2.88
16	111	111.15	7.56	15	5.0	14.70	14.70	2.94
17	105	105.14	7.1	15	5.0	14.81	14.81	2.96
18	252	252.33	17.31	15	5.0	14.58	14.58	2.92
19	317	317.42	21.78	15	5.0	14.57	14.57	2.91
20	108	108.14	7.41	15	5.0	14.59	14.59	2.92
21	144	144.19	9.72	15	5.0	14.83	14.83	2.97
22	148	148.20	9.99	15	5.0	14.83	14.83	2.97
23	242	242.32	16.54	15	5.0	14.65	14.65	2.93
24	290	290.38	19.83	15	5.0	14.64	14.64	2.93
25	240	240.32	16.41	15	5.0	14.64	14.64	2.93
14.668							2.934	

El proceso de calibración del medidor a la salida de la columna de suelo, consiste en registrar la lectura del sensor de presión para cada incremento de 0.5 Litros en volumen, luego se construye una curva de calibración de ajuste que relaciona el volumen en el recipiente con la lectura de voltaje que emite el sensor, que es equivalente a tener el peso del agua. Para conocer el caudal de salida se determina el cambio de volumen y se divide por el tiempo transcurrido. A continuación, en la Figura 72 y en la Gráfica 9 se muestra el proceso y resultado de la calibración del tanque para la medición del caudal de salida.

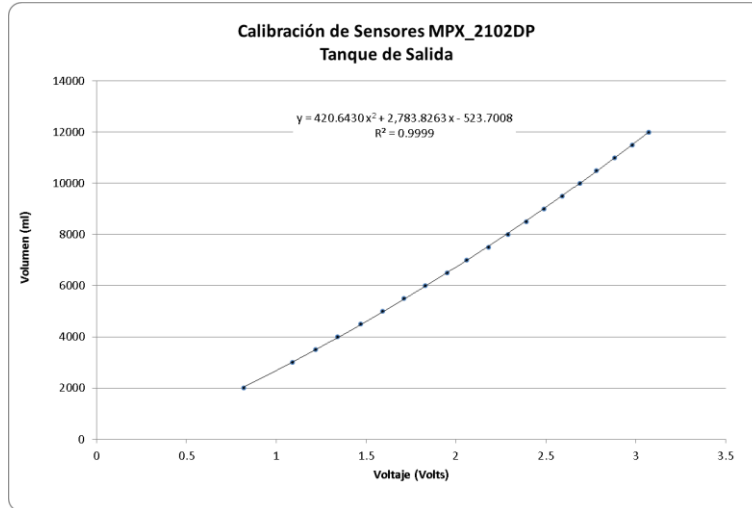
Figura 72. Tanque Para la Medición del Caudal de Salida



Tabla 32. Calibración del Tanque para la Medición del Caudal de Salida

Dato	PESO AGREGADO (ml)	PESO ACUMULADO (ml)	VOLTAJE MEDIO (V)	PESO ECUACIÓN LINEAL (gr)	PESO ECUACIÓN POTENCIAL (gr)
1	0	0	0.76	1341	1834.97
2	2000	2000	0.82	1611	2041.88
3	1000	3000	1.09	2826	3010.44
4	500	3500	1.22	3410	3498.65
5	500	4000	1.34	3950	3961.93
6	500	4500	1.47	4535	4477.49
7	500	5000	1.59	5075	4966.01
8	500	5500	1.71	5615	5466.64
9	500	6000	1.83	6154	5979.39
10	500	6500	1.95	6694	6504.26
11	500	7000	2.06	7189	6996.02
12	500	7500	2.18	7729	7544.10
13	500	8000	2.29	8224	8057.16
14	500	8500	2.39	8673	8532.40
15	500	9000	2.49	9123	9016.06
16	500	9500	2.59	9573	9508.12
17	500	10000	2.69	10023	10008.61
18	500	10500	2.78	10428	10466.23
19	500	11000	2.88	10878	10982.70
20	500	11500	2.98	11327	11507.58
21	500	12000	3.07	11732	11987.16
22	0	12000	3.07	11732	11987.16

Gráfica 9. Resultado de la Calibración de tanque para la Medición del Caudal de Salida



#### 4.12. RESUMEN GENERAL DE LAS ECUACIONES DE CALIBRACIÓN PARA LA INSTRUMENTACIÓN

##### 4.12.1. Medidores de contenido volumétrico de agua

$$\begin{aligned}
 \theta_1 &= -0.0532v_1^3 + 0.6631v_1^2 - 2.8030v_1 + 4.0871 \\
 \theta_2 &= -0.1191v_2 + 0.6297 \\
 \theta_3 &= -0.1212v_3 + 0.6350 \\
 \theta_4 &= -0.1218882v_4 + 0.6403217 \\
 \theta_5 &= -0.1213429v_5 + 0.6382262
 \end{aligned}
 \tag{13}$$

Donde:

$\theta_i$ : Contenido Volumétrico de agua en el punto de observación  $i$  ( $\text{cm}^3/\text{cm}^3$ ).

$v_i$ : Valor del Voltaje en voltios correspondiente al medidor  $i$ .

##### 4.12.2. Tensiómetros

$$\begin{aligned}
 h_1 &= -55.7649v_1 + 166.2929 \\
 h_2 &= -60.4456v_2 + 180.2033 \\
 h_3 &= -57.9994v_3 + 172.4474 \\
 h_4 &= -55.2368v_4 + 164.4155 \\
 h_5 &= -51.9964v_5 + 154.5696
 \end{aligned}
 \tag{14}$$

Donde:

$h_i$ : Presión de poros en el punto de observación  $i$  en Kpa.

$v_i$ : Valor del Voltaje en voltios correspondiente al medidor  $i$ .

##### 4.12.3. Medidores de caudal

Medidor de caudal de entrada:

$$Q_e = kn
 \tag{15}$$

Donde:

$Q_e$ : Caudal de entrada a la columna en Lpm.

$k$ : Constante de Volumen,  $k=2.934$  para  $n \leq 5$ ,  $K=4.036$  para  $10 < n > 5$ .

$n$ : Número de Vueltas en un segundo.

Medidor de caudal de salida:

$$P_s = 420.6430v^3 + 2783.8263v + 523.7008 \quad (16)$$

Donde:

$P_s$ : Peso acumulado de agua en el tanque (gr)

$v$ : voltaje medido en el sensor en voltios.

$Q_s = \frac{(P_s - P_{s+1})}{\Delta t}$  Caudal de salida en ml/s.

4.12.4. Medidor de temperatura

$$T = 1.01049v \quad (17)$$

Donde:

$T$ : Temperatura en °C.

$v$ : voltaje medido en el sensor en voltios.

#### 4.13. INSTALACIÓN E INSTRUMENTACIÓN DE LA COLUMNA DE SUELO

La instalación de los tensiómetros e higrómetros en la columna debe ser tal que se asegure que no existan fugas, el principal inconveniente de este proceso es la correcta colocación de los sensores de tal modo que se garantice su perpendicularidad con respecto a la dirección de flujo.

En primer lugar, los tensiómetros fueron diseñados con un diámetro de ½" limitados por el tamaño de cápsula porosa, la unión al tubo de la columna debe asegurar que no hayan fugas de agua, la forma más práctica que se encontró para realizar este acople fue utilizar una unión tipo dreeser que permite pasar a través de la pared tubo y garantizar la hermeticidad en el sistema. Esta unión se divide en dos partes, una que se pega con soldadura epóxica en el tubo de soporte y otra que se localiza en el tensiómetro para lograr un acople hermético, el detalle de este procedimiento se puede apreciar en la Figura 73.

Los higrómetros fueron concebidos de tal modo que se pueda hacer un acople a un racor de cierre rápido de cada una de las barras que lo componen, esto garantiza que no existan fugas, sin embargo, este racor debe estar inserto en el tubo principal de la columna de suelo. Lo primero que se realizan son perforaciones perfectamente alineadas y con la distancia y diámetro adecuado para permitir el pegado de dichos elementos, el pegado del racor en el tubo se realiza con una soldadura epóxica de alta resistencia y resistente al agua, en la Figura 74 se muestra el proceso antes mencionado.



Figura 73. Acople de los Tensiómetros en la Columna de Suelo

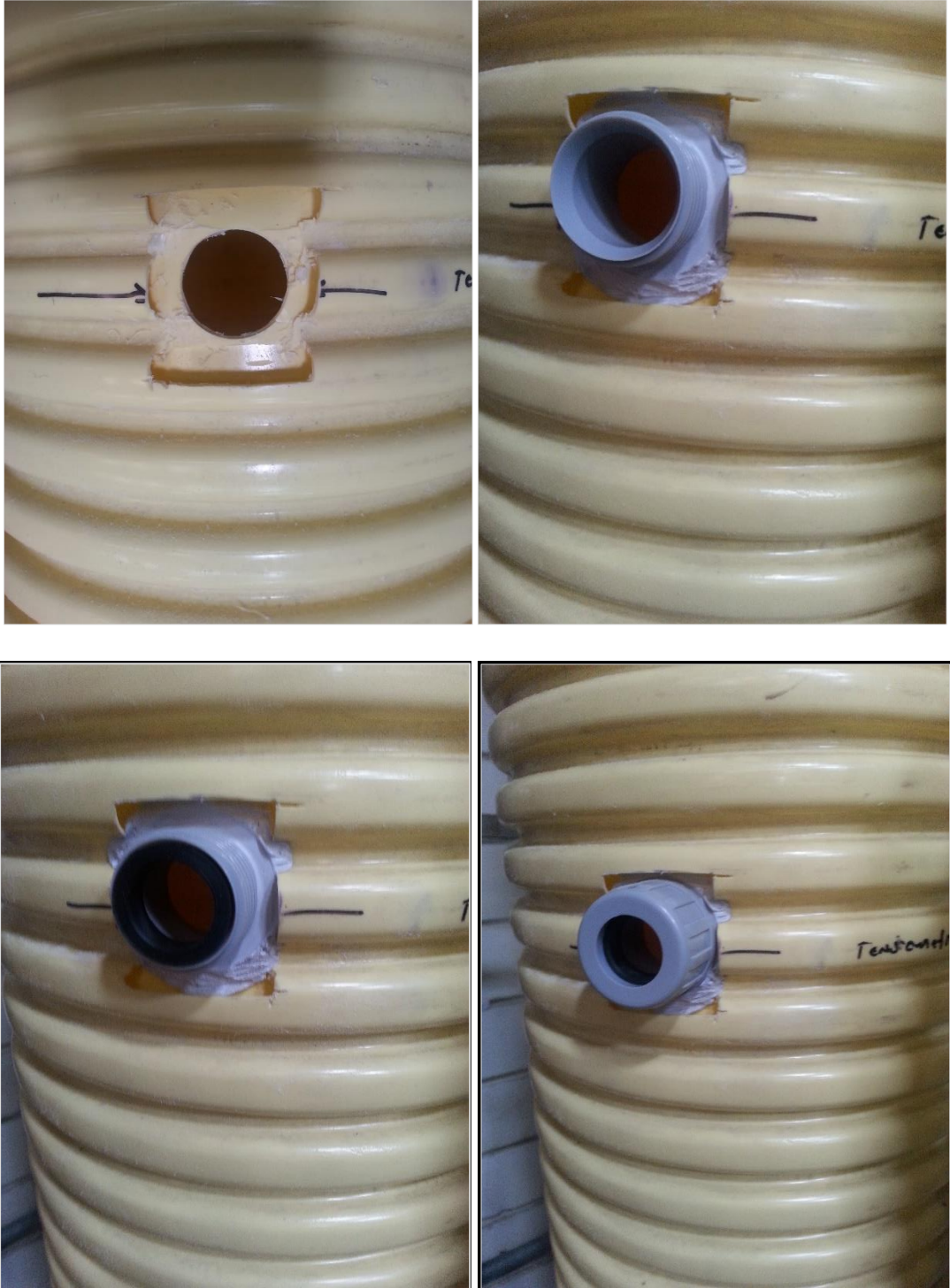


Figura 74. Acople de Higrómetros a la Columna de Suelo



Se debe tener especial cuidado de mantener la columna a nivel tanto en vertical como en la horizontal, esto garantiza que el flujo se desarrolle en una misma línea vertical y se pueda realizar la analogía unidimensional que requiere Hydrus 1D. La instalación de la columna de suelo se debe realizar en un lugar donde no se perciban vibraciones o cualquier otro tipo de alteración externa, una vez acomodados los suelos dentro de la columna, al igual que los instrumentos, esta debe permanecer inmóvil.

La primera etapa es la fijación y nivelación del soporte en acero, una vez nivelado, esta estructura se ancla a la pared para evitar que se mueva o se volqué, se utilizan abrazaderas conformadas con lámina de acero ancladas a la pared por medio de chazos, el esquema general del montaje se puede apreciar en la Figura 75.

Figura 75. Nivelación y Sujeción del soporte y Tubo a la Pared



Se verifica la hermeticidad en la unión del tubo con el soporte metálico, se coloca silicona líquida para asegurar que no haya fugas, también se coloca un sello de neopreno (cinta adhesiva de neopreno), esto asegura que no habrá fugas o acción de la capilaridad sobre la unión del tubo con la estructura metálica de soporte, en la Figura 76 se puede apreciar el proceso de colocado de la silicona.

Figura 76. Proceso de Sellado con Silicona



#### 4.13.1. Llenado de la Columna de Suelo

La acomodación de los suelos debe realizarse de tal manera que las partículas de suelo queden debidamente ordenadas y que cubran todos los espacios dentro de la columna. Se debe tener especial cuidado de no mezclar las capas que componen la columna de suelo. Es recomendable, solo como medida de verificación del contenido volumétrico inicial de agua, conocer la humedad inicial del suelo con un ensayo de laboratorio previo, del mismo modo, conocer el peso de suelo seco dentro de la columna, esto permitirá calcular la densidad *Bulk* resultante en el momento de la instalación del suelo. En la Figura 77 se muestra el proceso de llenado de la columna con los suelos presentados en el capítulo 3.

El llenado se realiza sin compactar los suelos, el suelo se ordena de la mejor manera posible y se recomienda que el suelo esté seco, además, el suelo no debe ser lanzado ya que esto reorganizaría las partículas de los materiales haciendo que las partículas que generen menos resistencia al aire en la caída queden sobre las demás. No se debe instalar ningún instrumento durante el proceso de llenado, es posible instalar los falsos tensiómetros (Figura 78) con el fin de crear un conducto en el suelo para la instalación de los tensiómetros, sin embargo, se decidió usar los falsos tensiómetros solo para garantizar la hermeticidad del sistema. Se deben sellar muy bien los agujeros de conexión entre la columna y los instrumentos con el fin de que no se pierda suelo y que haya fugas de agua.

Figura 77. Proceso de Acomodación del Suelo Dentro de la Columna



Una vez se llena la columna de suelo se hace circular un caudal por ella tal que se alcance la saturación uniformemente en toda la columna. Es recomendable realizar este primer tránsito para lograr que las partículas de suelo se acomoden, sedimenten y reorganicen. A causa de este flujo inicial, es posible que la cota superior del suelo sobre la columna cambie debido a la organización de las partículas, por lo tanto, se debe registrar este dato antes y después de esta prueba. Es importante tener en cuenta que el caudal de entrada debe generar un flujo lo más uniforme posible, se recomienda usar la válvula aspersora con un caudal de 3-5 ml/s, se debe disponer de un vertedero de excesos para evacuar las sobre elevaciones de agua.

Figura 78. Instalación y Nivelación de Falsos Tensiómetros



#### 4.13.2. Instalación de Instrumentos

Para evitar que escurra agua por los agujeros de acople es necesario realizar la instalación de los instrumentos en la columna cuando el contenido volumétrico de agua en ella se encuentre cercano al valor de equilibrio. Esto se logra aproximadamente en 20 días de desecamiento de la columna. Se recomienda realizar dos o más pruebas de carga y descarga de la columna antes de instalar los instrumentos.

Los primeros instrumentos en instalarse son los higrómetros, antes de la instalación se debe probar el correcto funcionamiento de estos elementos usando el sistema automatizado de datos y la interface de Labview. Con el fin de generar una caída de potencial, y de este modo comprobar el funcionamiento del medidor, es recomendable usar una resistencia de  $1\text{ k}\Omega$  colocada sobre los electrodos de acero inoxidable.

El acople de los higrómetros con el tubo que conforma la columna de suelo es de vital importancia, los electrodos se deben introducir de tal forma que el contacto entre estos y el suelo sea uniforme. Para una correcta instalación, se debe utilizar un lubricante basado en agua entre los racores de cierre rápido y las mangueras que componen los electrodos, es necesario introducirlos en un sólo movimiento, teniendo especial cuidado de asegurar el sello en las uniones de cierre rápido.

Posteriormente, se debe realizar la instalación de los tensiómetros. Si se dejaron instalados los falsos tensiómetros durante la colocación de los suelos, estos se deben retirar con sumo cuidado con el fin de no romper la estructura conformada en el suelo. En caso contrario, se debe realizar un agujero horizontal, exactamente del diámetro externo de la cápsula porosa menos 2 mm (para asegurar la comunicación entre los poros de la cápsula con el suelo) con ayuda de un barreno manual o un trozo de tubo biselado. Es importante tener en cuenta que del cuidado con el que se realice este proceso depende el éxito de la medición de la tensión matricial, ya que si no existe un adecuado contacto entre la cápsula y el suelo no es posible tener una medición confiable.

Antes de realizar la instalación de los tensiómetros es necesario realizar el llenado y prueba de funcionamiento tal como se indica en el capítulo 4.8.1.

Si se decide instalar los instrumentos en el proceso de llenado de la columna, se deben seguir las siguientes recomendaciones:

El suelo debe tener un contenido volumétrico de agua entre  $0.03 - 0.05\text{ cm}^3/\text{cm}^3$ .

Antes de llenar la columna de suelo se deben instalar los higrómetros en la medida en que se va acomodando el suelo, los higrómetros se deben insertar teniendo especial cuidado de que el racor de cierre rápido haga sello hidráulico.

En los orificios correspondientes a los tensiómetros se recomienda poner un tapón para evitar la pérdida del suelo que se va acomodando dentro de la columna, una vez se llene por completo y se hallan instalado todos los higrómetros se procede a retirar los taponos e insertar los tensiómetros. Si la porosidad resultante del suelo lo permite, se introducen lentamente los tensiómetros sin necesidad de realizar un agujero previo con el barreno manual, no se deben mover los tensiómetros. Una vez insertos se deben asegurar con las roscas de la unión dreeser.

#### 4.13.3. Prueba de lectura y de Captura de Datos en Régimen Permanente

Esta primera prueba es requerida para asegurar que todos los medidores funcionen adecuadamente, si se desea realizar otra prueba se debe desecar nuevamente la columna hasta su punto de equilibrio. A continuación, en la Figura 81 se muestran las condiciones de humedad y tensión iniciales para esta prueba y en

la Figura 82 se muestra el paso del frente de humedad por el punto de medición 1 ( $\theta_s$  y  $H_s$ ) para una condición de caudal de entrada de 3 mm/s.

En esta primera experiencia se detectó que uno de los tensiómetros no respondió adecuadamente. Luego de revisarlo se observó que la cápsula tenía gran parte de su superficie obstruida, al parecer fue debido a un error en la fabricación, por lo tanto, se procedió a sustituirla por una nueva.

Las curvas de retención obtenidas para cada punto de medición se muestran en la Figura 80, si se observa el comportamiento de estas se puede decir que los resultados son favorables y que el comportamiento general de los sensores fue adecuado. Esta primera prueba sirvió para ajustar el tiempo de muestreo que anteriormente se había simulado con un modelo supuesto directo en Hydrus y se logró probar la totalidad de los sensores obteniendo resultados aceptables.

Figura 79. Esquema de la Instalación de Instrumentos para Prueba de Funcionamiento

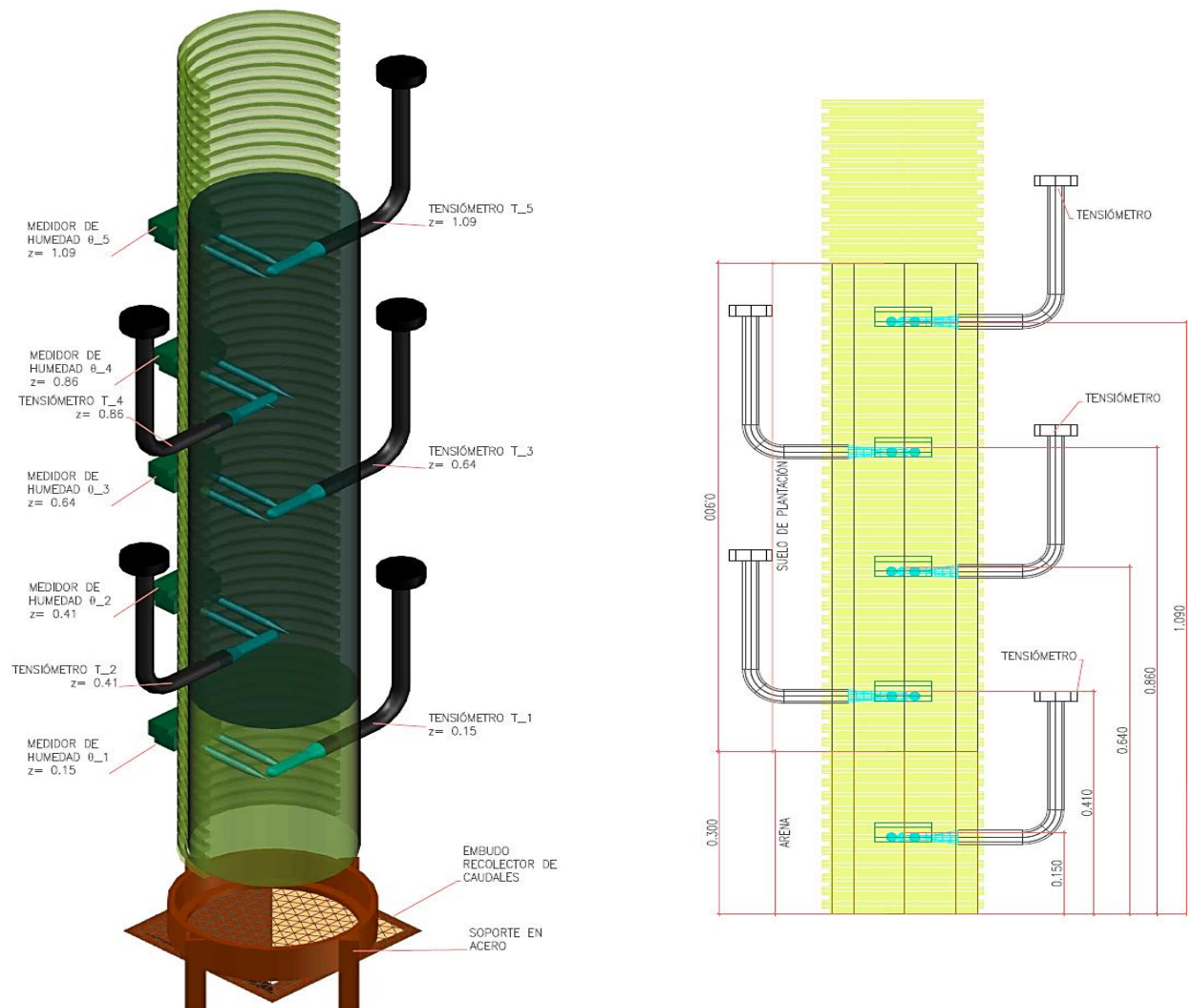


Figura 80. Curvas de Retención de la Primera Prueba de Funcionamiento de la Columna

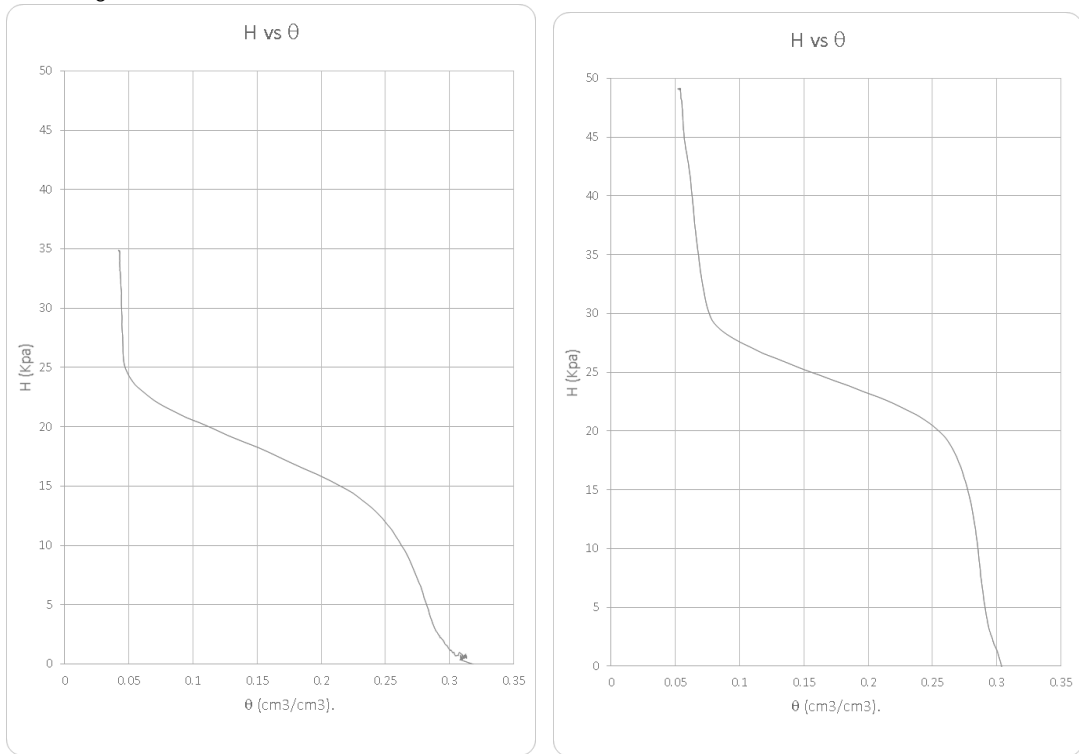


Figura 81. inicio de la Medición de la Prueba de Funcionamiento para Condiciones Permanentes

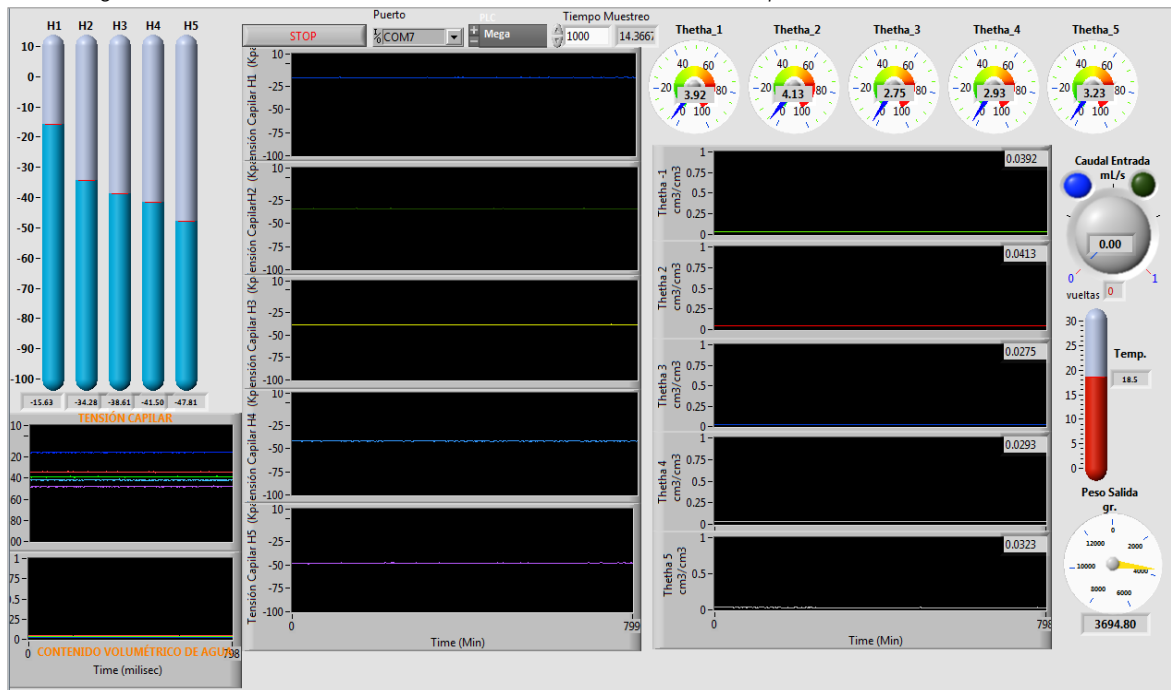
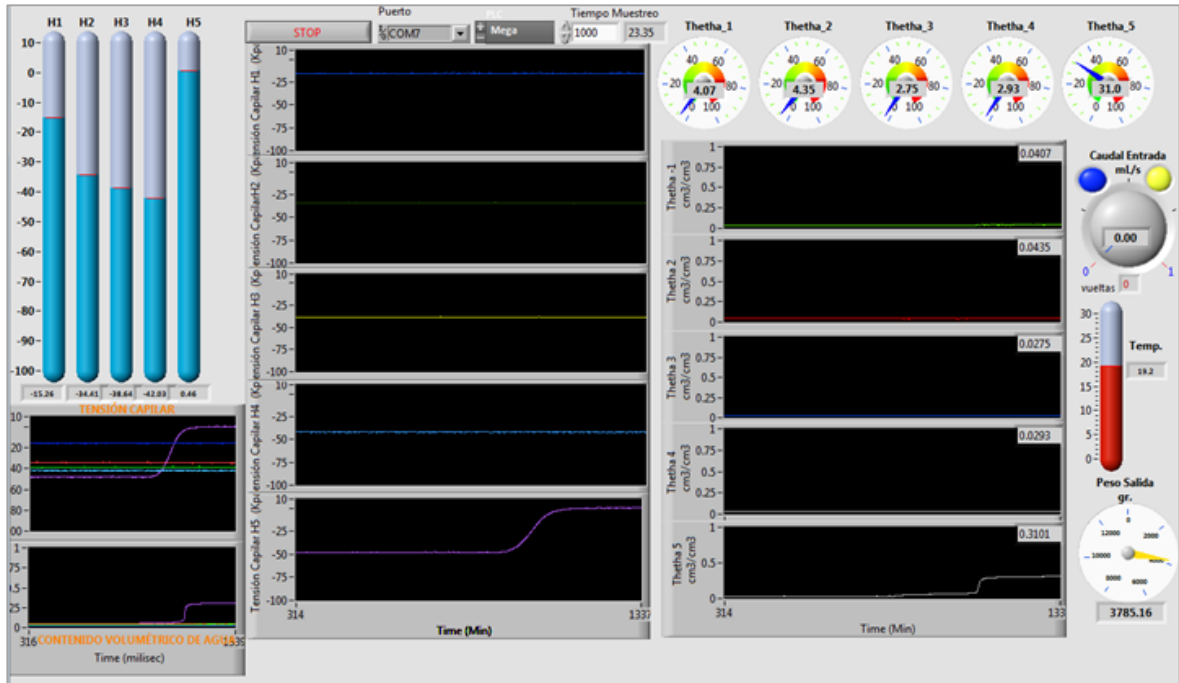


Figura 82. Frente de Humedad Cruza el Primer Punto de Medición





## 5. MODELO DE COLUMNA DE SUELO Y CAPTURA DE DATOS

La modelación inversa requiere diferentes mediciones de contenido de agua y potencial para diferentes caudales, cada uno de estos ensayos representa el mismo comportamiento de la curva  $h$  vs  $\theta$ . En esta tesis se eligieron tres mediciones de caudal y un total de cinco puntos de medición separados uniformemente en las dos capas de suelo que conforman la columna de suelo; se disponen cuatro puntos en la capa de suelo de plantación y uno para la cama de arena, como se muestra en la Figura 79.

El sistema electrónico y la programación en LabView, permiten la captura de datos hasta de cada milisegundo, sin embargo, dada la duración de cada experimento (aprox. 1.5 hr) se optó por tomar muestras cada segundo para la totalidad de los medidores. A continuación, en la Figura 83 se muestra el montaje de columna de suelo preparado para el inicio de la medición donde se pueden observar los diferentes sensores instalados, cada sensor se verifica antes del inicio de la captura de datos.

*Figura 83. Montaje de Columna de Suelo en Proceso de Toma de Datos*





Como se muestra en la Figura 84 el suministro de agua potable se realiza desde un taque de alimentación y nivel constante que a través de una bomba centrífuga impulsa el agua hasta llegar a la válvula aspersora. En el tanque se incluye un sistema de recirculación para mantener una presión constante en la descarga y asegurar que el equipo de bombeo no se sobre caliente. Este sistema alimenta a la válvula aspersora para posteriormente distribuir el agua uniformemente en la columna, cada sensor se prueba antes de cada experimento, del mismo modo, se realiza una prueba de lectura inicial de todos los sensores para verificar que el sistema electrónico de captura de datos esté registrando todos los datos adecuadamente.

*Figura 84. Tanque de Suministro y Válvula Aspersora*



### 5.1. Mediciones en Régimen Permanente

En primer lugar, se verifica la estabilidad el caudal de entrada, las lecturas del sensor se comparan con datos tomados directamente desde la alimentación a la columna gracias a una tubería que sirve de *by pass*. Se toman en total 20 lecturas de caudal utilizando el método gravimétrico y la lectura que marca el sensor, en la Tabla 34

se puede apreciar que, durante el tiempo de medición de aproximadamente una hora, la variación del caudal es aceptable.

Tabla 33. Estabilidad del Caudal de Entrada para el Primer Experimento

Estabilidad del Caudal de Entrada			
Temperatura °C:	21.00	Fecha:	24/01/2016
Densidad (gr/ml):	0.998		
Dato	Peso (gr.)	Tiempo (seg)	Caudal (ml/s)
1	43.33	14.71	2.951
2	59.73	19.97	2.997
3	45.99	14.92	3.089
4	52.74	17.37	3.042
5	42.98	14.37	2.997
6	78.91	26.38	2.997
7	42.72	14.50	2.952
8	35.58	11.90	2.996
9	21.35	7.03	3.043
10	53.72	17.69	3.043
11	35.72	11.59	3.088
12	69.18	23.49	2.951
13	56.92	19.03	2.997
14	62.02	20.73	2.998
15	19.91	6.46	3.088
16	28.22	9.16	3.087
17	41.48	13.46	3.088
18	33.73	11.45	2.952
19	46.56	15.81	2.951
20	65.83	21.05	3.134
			3.022

Tabla 34. Estabilidad del Caudal de Entrada para el Segundo Experimento

Estabilidad del Caudal de Entrada			
Temperatura °C:	19.50	Fecha:	19/03/2016
Densidad (gr/ml):	0.998		
Dato	Peso (gr.)	Tiempo (seg)	Caudal (ml/s)
1	43.1	21.57	2.001
2	59.5	29.85	1.997
3	45.3	22.63	2.005
4	52.2	26.15	2.000
5	42.9	21.51	1.998
6	78.6	39.45	1.996
7	42.1	21.13	1.996
8	35.5	17.56	2.025
9	21.2	10.41	2.040
10	52.8	26.13	2.024
11	34.8	17.41	2.002
12	68.8	33.91	2.032
13	56	27.87	2.013
14	61.4	30.64	2.007
15	19.6	9.76	2.012
16	27.3	13.67	2.000

Estabilidad del Caudal de Entrada			
17	41.1	20.54	2.004
18	33.5	16.81	1.996
19	46.1	23.15	1.995
20	65.6	32.78	2.005
			2.007

Tabla 35. Estabilidad del Caudal de Entrada para el Tercer Experimento

Estabilidad del Caudal de Entrada	
-----------------------------------	--

Temperatura °C:	21.00
Densidad (gr/ml):	0.998

Fecha:	11/06/2016
--------	------------

Dato	Peso (gr.)	Tiempo (seg)	Caudal (ml/s)
1	42.1	28.35	1.488
2	44.4	29.8	1.493
3	46.7	31.42	1.489
4	56.6	38.2	1.485
5	50.2	33.75	1.490
6	44.3	29.64	1.498
7	46.7	31.27	1.496
8	35.3	23.73	1.491
9	45.3	30.48	1.489
10	44.4	29.82	1.492
11	61.1	41.23	1.485
12	44.3	29.88	1.486
13	48.3	32.64	1.483
14	52.4	35.26	1.489
15	50.8	34.32	1.483
16	48.1	32.43	1.486
17	52.3	35.3	1.485
18	33.1	22.31	1.487
19	40.9	27.58	1.486
20	21.1	14.23	1.486
			1.488

A continuación, se inicia el programa en Lab View para la captura de datos, se inicia un cronómetro de mano para poder llevar el control del tiempo inicial de entrada de caudal y el de salida de la primera gota de agua de la columna de suelo y sincronizar el medidor. Una vez verificado el funcionamiento de todos los sensores en Labview, se cierra el *by pass* y comienza la alimentación de caudal sobre la columna.

Los caudales de entrada que permanecen estables en todo el experimento tienen un valor de 3.022, 2.007 y de 1.488 ml/s. Los resultados de las mediciones se resumen en el anexo correspondiente, del mismo modo, desde la Figura 85 hasta la Figura 87 se puede ver el avance del frente de humedad para cada caudal.

Figura 85. Capturas de las Mediciones Registradas en LabView Experimento 1

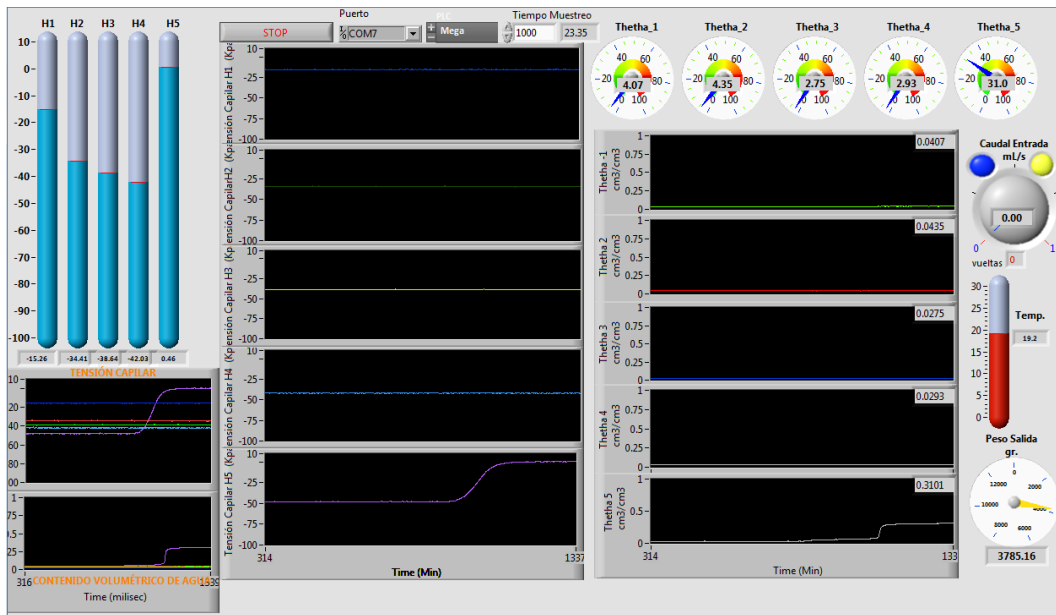
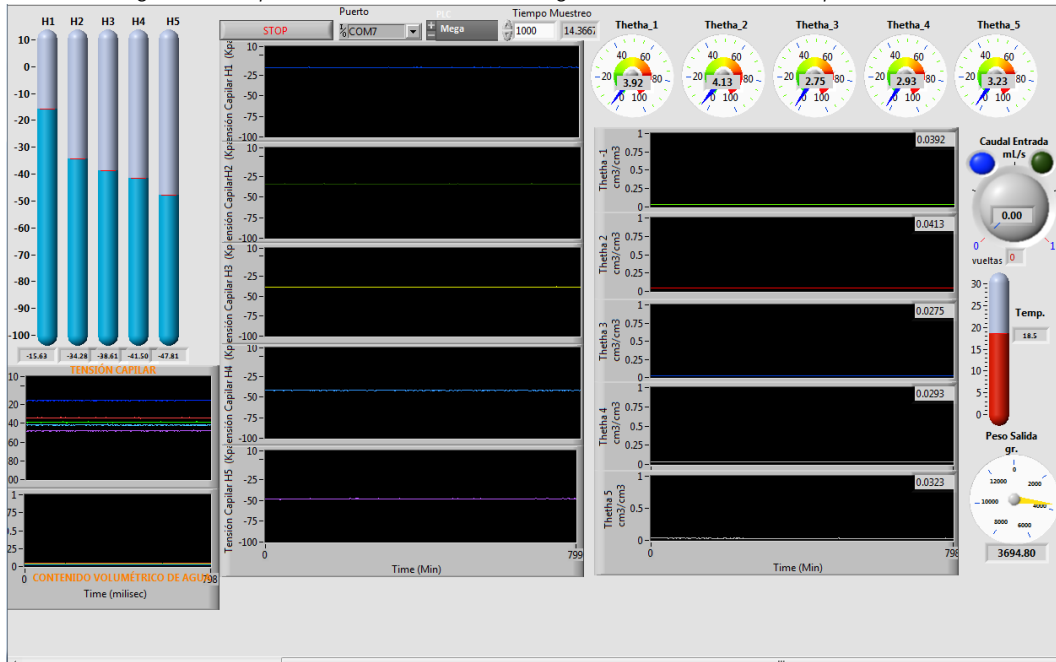


Figura 86. Capturas de las Mediciones Registradas en LabView Experimento 2

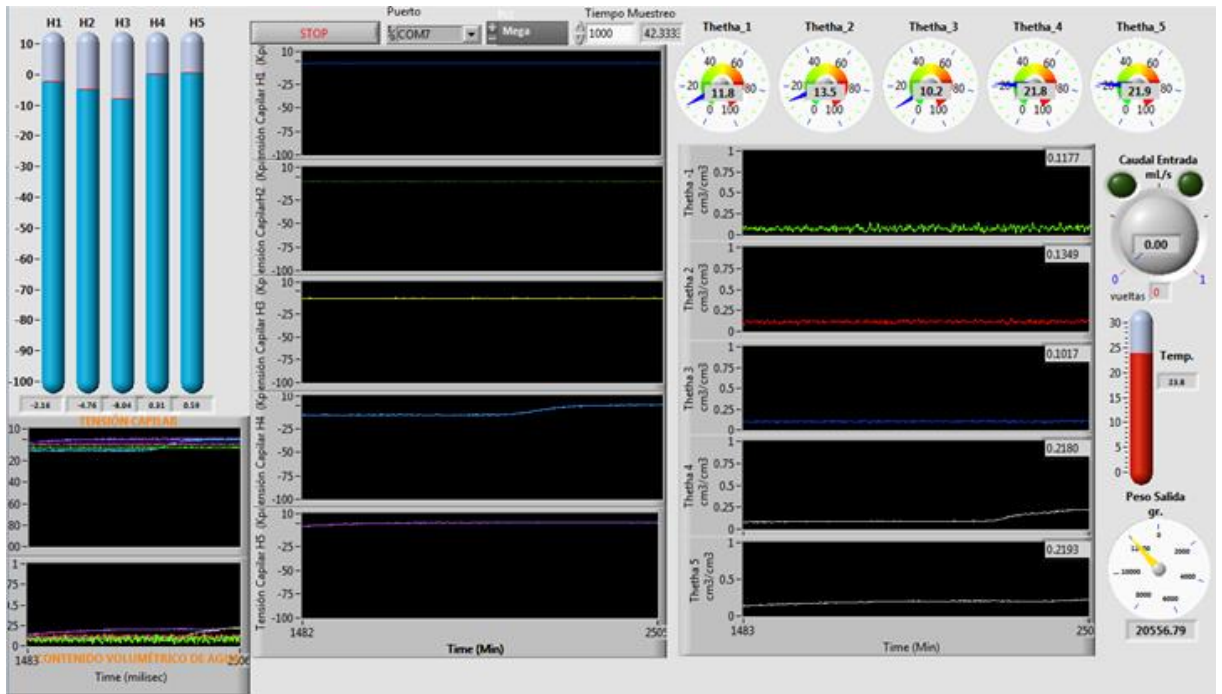
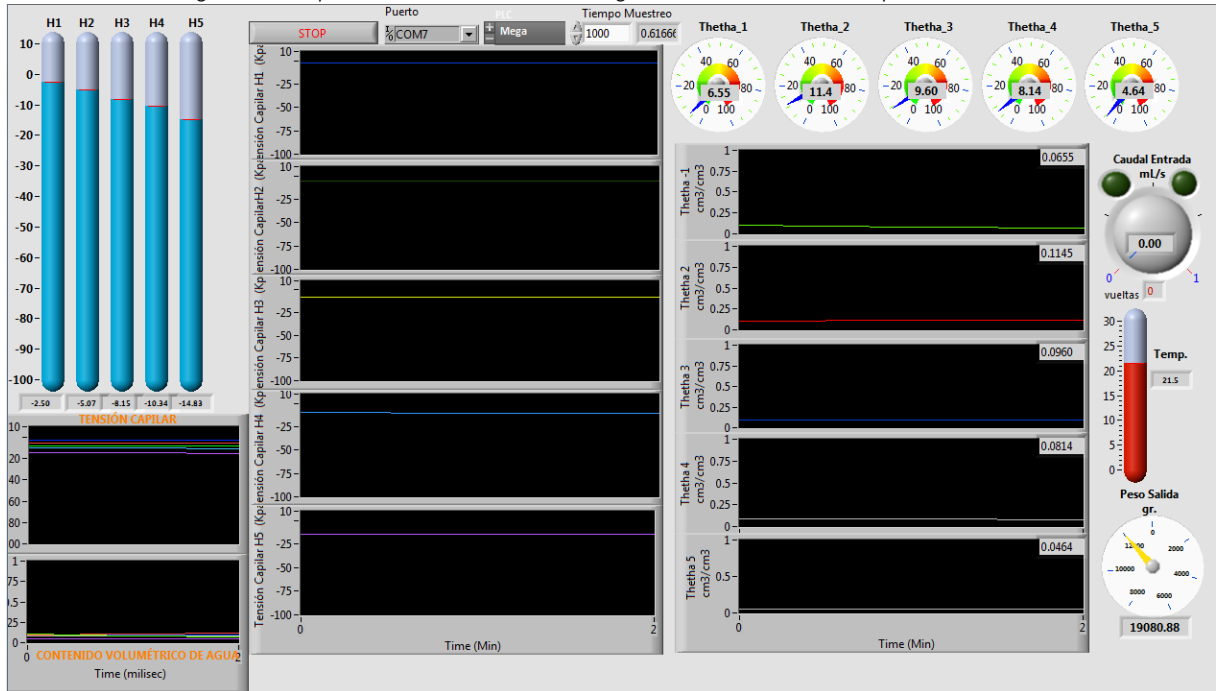
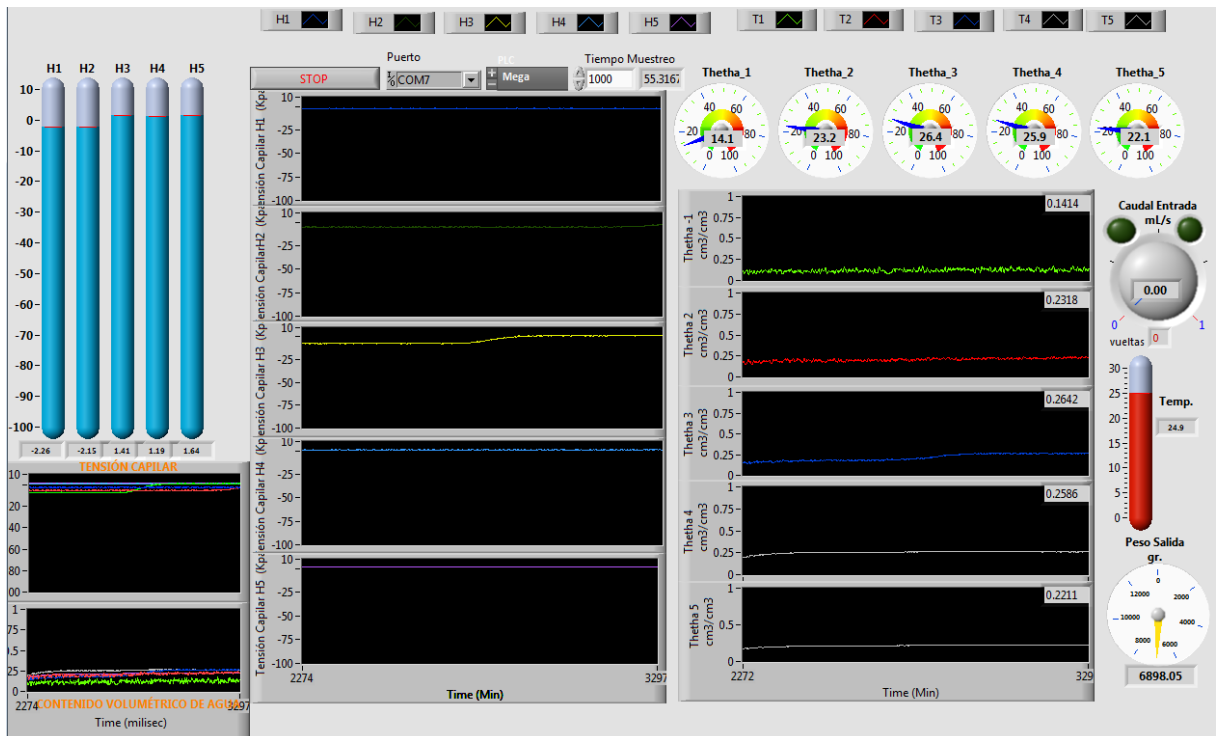
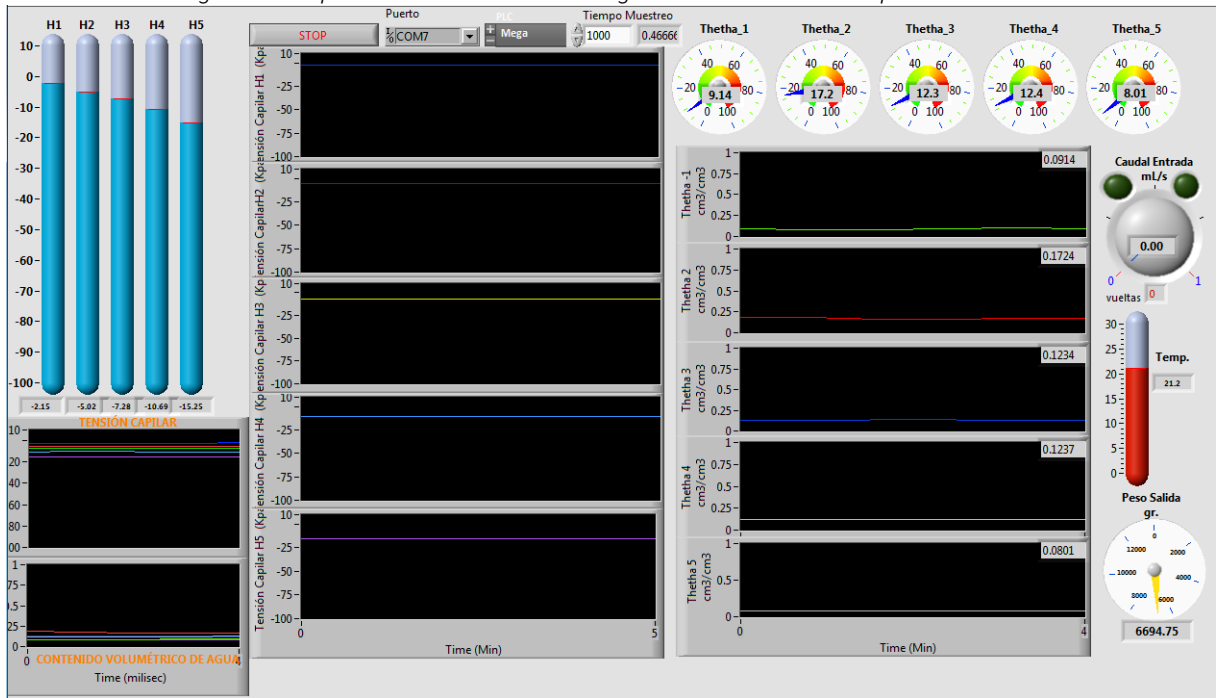


Figura 87. Capturas de las Mediciones Registradas en Lab View Experimento 3

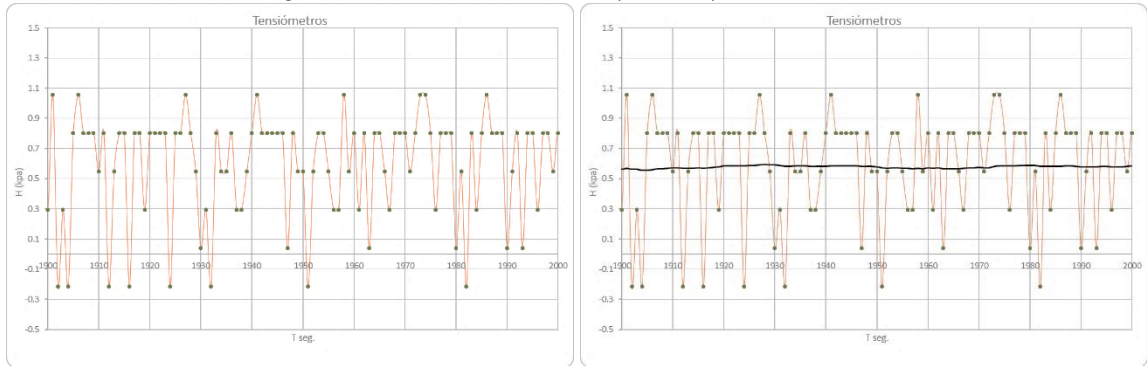


### 5.1.1. Análisis Estadístico de las Mediciones

El principal problema que se tiene en el uso de dispositivos electrónicos análogos es el ruido en la señal de respuesta de cada instrumento, sin embargo, las pruebas realizadas muestran que el ruido es oscilante y se mueve alrededor del valor medio que corresponde a una medición dada, por lo tanto, se puede suponer que la fluctuación provocada por el ruido es un error sistemático. Cómo los picos de ruido están por encima y debajo de un valor medio (ver Figura 88) es posible considerar que el promedio de datos consecutivos está muy cercano al valor ajustado en la calibración de cada medidor.

Se plantea entonces realizar una media móvil con un periodo de 5 a 10 datos consecutivos con el fin de reducir los picos de ruido que se presentan en la señal. En la Figura 88 se muestra un ejemplo de la señal ajustada y sin ajustar. Este procedimiento se realiza en todos los sensores de medición análogos (sensores de presión y de contenido volumétrico de agua).

Figura 88. Media Móvil Utilizada para Limpieza de la Señal



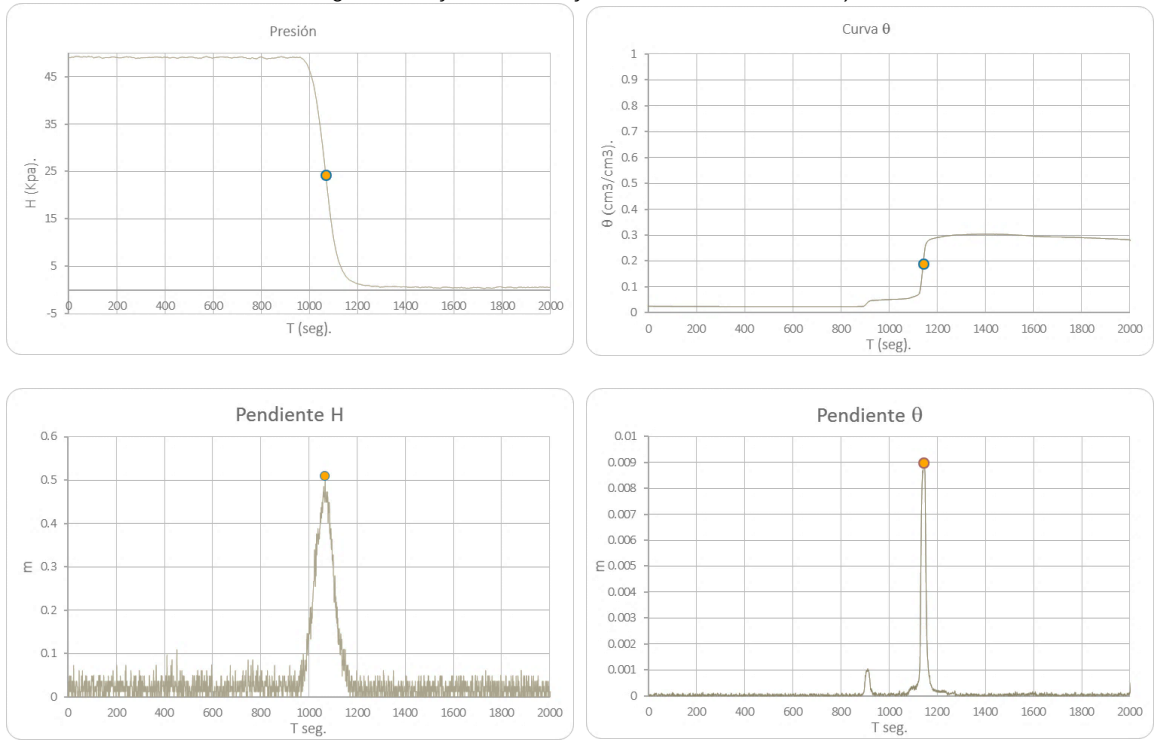
La media móvil se basa en la construcción de una serie a partir de la media de un número determinado de datos en la que sucesivamente se va quitando y añadiendo un dato en los extremos del intervalo seleccionado, es decir, el último dato de la nueva serie es reemplazado por el consecutivo al extremo superior del intervalo.

Luego de realizar las mediciones de tensión y contenido volumétrico de agua se encontró que el tiempo de respuesta de los tensiómetros y de los hidrómetros era diferente, esto se debe principalmente a que cada instrumento tiene un volumen de control distinto. Se debe corregir este desfase para poder tener una mejor precisión en la construcción de las curvas de retención. Como se muestra en la Figura 86 la curva de tensión matricial y de humedad tienen la misma forma en alargada, es decir, ambas presentan un evidente punto de inflexión. Este punto debe ser común en ambos comportamientos, por lo tanto, dicho punto se puede utilizar para corregir el desfase en la respuesta de cada instrumento.

Para deducir el punto de inflexión se calcula el valor de la pendiente entre dos puntos consecutivos de las curvas de tensión y de humedad, el punto de inflexión se encontrará entonces en el mayor valor de la pendiente. Esta corrección se realiza para cada uno de los puntos de medición, en la Figura 89 se muestra el proceso realizado. El detalle de este proceso se puede consultar en los anexos. Para el ejemplo mostrado en la Figura 89 se encontró un desfase entre las dos curvas de 76 segundos, se muestra que los medidores de tensión reaccionan más rápido que el medidor de humedad; esto se debe principalmente a que el medidor de humedad mide la pérdida de potencial debida a la inclusión de agua en el medio y requiere de un mayor volumen de control, en cambio, el tensiómetro mide directamente la presión en mediación de la cápsula porosa que lo conforma y no requiere de un mayor volumen de control que el delimitado por dicha cápsula. La Figura 90 muestra la curva con y sin corrección del desfase.

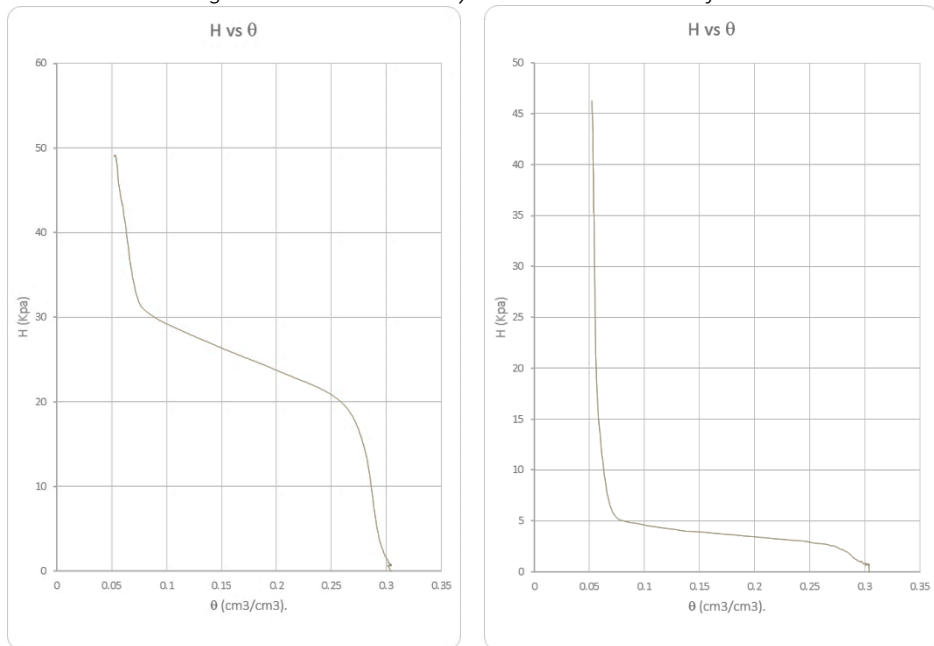


Figura 89. Ajuste del Desfase en la Medición de H y  $\theta$



Para construir la curva de retención se mantiene el punto de inflexión, común para ambas curvas, y se conforman las curvas con los demás datos medidos de presión y contenido volumétrico de agua. El rango de datos usados para las curvas de retención se selecciona teniendo en cuenta la variación para ambas curvas.

Figura 90. Curva H  $\theta$  con y sin Corrección del Desfase



## 6. FLUJO EN LA ZONA NO SATURADA

Partiendo de la ley de Darcy se puede inferir que esta se aplica únicamente para la fase líquida y no tiene en cuenta la fase gaseosa, es decir, el flujo transcurre en el área transversal que ocupa todo el espacio poroso. En la mayoría de las situaciones el suelo contiene aire que condiciona el flujo del agua, por lo tanto, en condiciones no saturadas, la velocidad del agua no es igual a la propuesta por Darcy, del mismo modo, se presentan variaciones en la conductividad debido a la distribución de humedad en el suelo. Para tener en cuenta esta transición, Buckingham implementa, en lugar de la conductividad hidráulica saturada ( $K_s$ ) en la ecuación de Darcy, una función de conductividad hidráulica ( $K$ ) que es función principalmente del contenido volumétrico de agua contenida en el suelo, en la ecuación (18) se presenta la ley de Darcy y en la ecuación (19) lo que se conoce como ecuación de Darcy-Buckingham. (Hincapié Gómez, 2011, p. 119)

$$q = -K_s \nabla H \quad (18)$$

$$q = -K \nabla H \quad (19)$$

$q$ : Densidad de flujo (L/T)

$K_s$ : Conductividad Hidráulica saturada (L/T)

$K$ : Función de conductividad hidráulica de Buckingham (L/T)

$\nabla H$ : Gradiente hidráulico (L)

Nota: el signo negativo de las ecuaciones (18) y (19) indica que el agua fluye en la dirección en que disminuye la carga total.

El gradiente hidráulico está conformado principalmente por el potencial de presión gravitacional  $h_g$  y el potencial de presión matricial  $h_m$ , también conocido como presión de poros  $P_p$  que expresado como presión de columna de agua se denomina  $h$ . Se debe tener en cuenta que se suponen nulos los demás componentes de potencial (Forero, 2012, p. 39). Entonces, la ecuación de Darcy-Buckingham, se puede escribir de la siguiente manera:

$$q = -K \nabla (h_g + h_m) = -K \nabla \left( h_g + \frac{P_p}{\rho g} \right) \quad (20)$$

Si se considera únicamente la componente vertical  $z$ , y se tiene en cuenta que la conductividad hidráulica es una función del contenido volumétrico de agua  $\theta$ , la ecuación (20) se puede escribir de la siguiente forma:

$$q = -K(\theta) \nabla (h_g + h) = -K(\theta) \frac{\partial}{\partial z} (Z + h) \quad (21)$$

$$q_z = -K(\theta) \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right)$$

Si aplicamos el principio de continuidad, y sustituyendo en la ecuación (21), se obtiene lo que se conoce como la ecuación de Richards en su forma unidimensional:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = - \frac{\partial q}{\partial z}$$

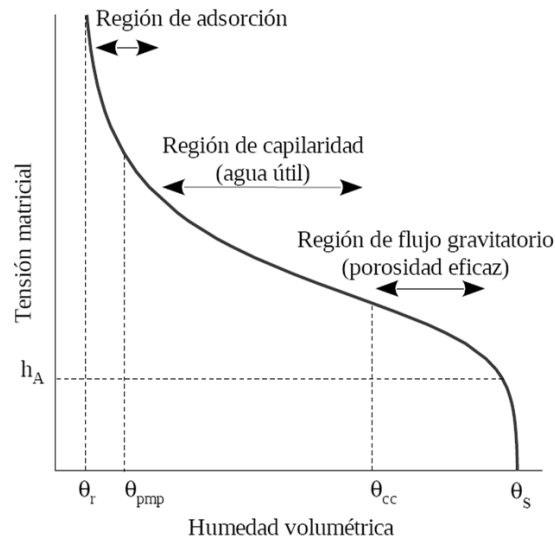
$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K \left( \frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (22)$$

La solución de la ecuación de Richards parte de las funciones características del suelo: conductividad hidráulica  $K$  y la curva de retención de humedad  $h(\theta)$ , estas pueden ser obtenidas experimentalmente o por medio de la solución numérica de la ecuación de Richards.

### 6.1. Curva de Retención de agua $\theta$

El contenido volumétrico de agua en el suelo no saturado, está relacionado con la presión de poros del mismo, la curva presentada en la Figura 91 representa la curva de retención de agua para un suelo hipotético, se pueden apreciar las diferentes zonas que están clasificadas de acuerdo al proceso predominante: Adsorción, Capilaridad y Flujo Gravitatorio. El valor máximo del contenido volumétrico de agua o de saturación  $\theta_s$  está determinado por la porosidad total, debido a que el agua ocupa todo el volumen de vacío de poros y micro poros. La tensión  $h_a$ , conocida como tensión o presión de entrada de aire, representa un punto en el que un aumento en la presión se produce un descenso instantáneo del contenido volumétrico de agua, es decir,  $h_a$  se presenta cuando  $\frac{d\theta}{dh} = 0$ . Al igual que  $\theta_r$ ,  $h_a$  es considerado como parámetros empíricos de ajuste y sus valores dependen del modelo matemático elegido para describir el comportamiento de la curva de retención de agua (Dietrich, 2013, p. 65,66).

Figura 91. Curva de Retención de Agua (Dietrich, 2013, p. 66)



La curva de retención de agua del suelo (CRH) está definida como la relación entre el contenido de humedad  $\theta$ , y el potencial mátrico del suelo  $h$ . Esta curva indica el contenido volumétrico de agua que un determinado suelo puede retener y liberar para diferentes presiones o tensiones, es decir, los valores de presión de succión  $h$ , muestran la facilidad o dificultad con la que el agua puede ser removida del suelo y la cantidad de agua que es retenida. Pueden conformarse con medidas simultáneas de contenido volumétrico de agua y de potencial de presión tomados en laboratorio o in situ. Una de las grandes limitaciones del uso de las curvas de retención del suelo es que el contenido volumétrico de agua para una succión dada no depende solamente del valor de la succión, sino, del historial de humedad del propio suelo (Saifadeen & Gladnyeva, n.d., p. 10)

Analíticamente Las funciones paramétricas que describen el comportamiento de la CRH han sido estudiadas por diversos autores, entre ellos, van Genuchten planteó una ecuación en la cual se relaciona el contenido volumétrico de agua efectivo y el potencial de succión. Esta expresión es ampliamente utilizada actualmente, en la ecuación (23) se aprecia su constitución (Forero, 2012, p. 49).

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|h|)^n]^m} & h < 0 \text{ y } m = 1 - \frac{1}{n} \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases}$$

$$S_e = \frac{1}{(1 + (\alpha|h|)^n)^m} \quad \begin{cases} \theta(h), & \theta_r \leq \theta(h) \leq \theta_s \\ \theta_r, & 0 \leq \theta_r \leq 0.15 \\ \theta_s, & 0.25 \leq \theta_s \leq 0.60 \\ \alpha, & 0.002 \leq \alpha \leq 0.15 \\ n, & 1.00 \leq n \leq 3 \end{cases} \quad (23)$$

Donde:

$\theta_r$ : Contenido volumétrico de agua residual  $\frac{L^3}{L^3}$

$\theta_s$ : Contenido volumétrico de agua a saturación

$\theta_{cc}$ : Contenido volumétrico de agua para la capacidad de campo

$\theta_{pmp}$ : Contenido volumétrico de agua para el punto de marchitez

$\alpha$ : Parámetro que representa el potencial de entrada de aire  $L^{-1}$

$h$ : Valor de la presión matricial (carga de presión capilar  $\psi$ )  $L$

$m, n$ : Parámetros adimensionales que se asocian con la distribución de poros en el suelo

El modelo de van Genuchten contiene 3 parámetros adimensionales ( $\alpha$ ,  $m$  y  $n$ ) que deben determinarse experimentalmente para una completa descripción de la curva de retención. Se recomienda determinar la curva  $\theta(h)$  partiendo de valores pequeños de humedad ya que es notoria la influencia sobre la curva  $K_r(h)$ .

La ecuación tiene como límite la expresión de Brooks y Corey con  $\lambda = mn=0.4$ , límite que se logra cuando  $n$  tiende a infinito, y se tiene entonces, la curva de Brooks y Corey, con un determinado valor de entrada de aire. Las restricciones usuales utilizadas para la ecuación de Van Genuchten son  $m = 1-1/n$  y  $m = 1-2/n$ .

Cuando se tienen suelos uniformes como la arena los valores de  $n$  tienden a ser altos, lo que indica una gran pendiente en la curva de retención. En estos suelos el valor de  $\alpha$  se aproxima al inverso de la altura de presión en el punto de mayor pendiente. El valor de  $K_r$  se ajusta bien en suelos más finos, sin embargo, mantiene relativamente valores bajos en la exactitud del ajuste.

Según el modelo de van Genuchten Para suelos finos la curva predicha no corresponde a la curva observada, esto se atribuye a la expresión para  $\theta(h)$ . Esta expresión arroja valores de  $\theta_r$  menores por esto es recomendable siempre disponer de procedimientos para la determinación experimental de dicho parámetro.

## 6.2. Conductividad hidráulica

Esta propiedad es usada para identificar la resistencia que ejerce el suelo cuando se genera un flujo de agua a través de este. Depende de las propiedades físicas y químicas del fluido y del medio en que se desarrolla el flujo, tiene unidades  $[LT^{-1}]$ . Se puede decir que la conductividad es equivalente a la movilidad, definida como la relación ente la permeabilidad y la viscosidad cinemática. La conductividad hidráulica se puede clasificar en dos tipos, dependiendo de la zona en que se encuentra: zona saturada o zona no saturada.

En suelos saturados, la conductividad hidráulica saturada obedece la ley de Darcy, sin embargo, en la zona no saturada la conductividad es una función del contenido volumétrico de agua  $K(\theta)$ . Esta relación se encuentra bien definida gracias a diversas investigaciones realizadas con base en modelos experimentales. Se ha encontrado que la conductividad decrece rápidamente a medida que disminuye el contenido volumétrico de agua respecto al valor de saturación de suelo, (Forero, 2012, p. 52) enuncia varias de las razones que permiten evidenciar este comportamiento:

- La sección disponible para el flujo decrece con un aumento de  $\theta$ .
- El cambio de la conductividad hidráulica de un medio poroso es directamente proporcional al cuadrado del radio de los poros, mientras que la humedad es proporcional a la primera potencia del mismo radio, por lo que se puede esperar que  $K$  decrezca más rápido que  $\theta$ .
- En la medida que  $\theta$  decrece, se incrementa la posibilidad de que parte del agua quede atrapada en poros y cuñas aisladas de la red tridimensional general del agua, es decir, una vez se rompa la continuidad en los poros, no puede haber flujo en fase líquida.

El método para estimar la función de conductividad hidráulica es el planteado por Mualem que se muestra en la ecuación (24).

$$k_r(\theta) = \frac{k(\theta)}{k_s} = \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{1/2} \left[ 1 - \left( 1 - \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]^{\frac{m}{n-1}} \right)^m \right] \quad (24)$$

Donde:

$m, n$ : Parámetros adimensionales que se asocian con la distribución de poros en el suelo.

$k_r(\theta)$ : Conductividad relativa, adimensional.

$k(\theta)$ : Función de conductividad hidráulica no saturada  $L T^{-1}$

$k_s$ : Conductividad hidráulica a saturación  $L T^{-1}$

$\theta_e = \left[ \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right]$ : Saturación efectiva (adimensional)

### 6.3. HYDRUS 1D

La curva de retención de la humedad, describe la relación entre la humedad volumétrica ( $\theta$ ) y la tensión capilar en las partículas de suelo ( $h$ ), en el ajuste inverso con Hydrus, es posible realizar una calibración precisa del movimiento del flujo en el suelo (Pujorlas, 2005). El modelo que implementa este software resuelve la ecuación de Richards modificada (J. Šimůnek, M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, 2013).

La modelación directa en Hydrus requiere datos meteorológicos, hidrológicos, propiedades del suelo y si es el caso, la caracterización química de solutos. La idealización del suelo se realiza a través de un editor de geometría donde se establecen los límites de los diferentes sustratos que componen el suelo en estudio, se pueden incluir diferentes tipos de suelos. Otro factor que es importante en la modelación es el tiempo, este determina la convergencia de las diferentes ecuaciones que se usan en Hydrus.

Hydrus resuelve la ecuación (22), basado en el uso de elementos finitos en el espacio y diferencias finitas en el tiempo de manera iterativa (Dietrich, 2013, p. 72). La ecuación (22) tiene en cuenta que el ángulo del flujo y la vertical gravitacional es igual a cero, lo mismo ocurre con el término fuente de sumidero. El modelo matricial iterativo utilizado para la solución de la ecuación de Richards se muestra a continuación (Dietrich, 2013, p. 72):

$$P_w^{j+1,k} \vec{h}^{j+1,k+1} = \vec{F}_w \quad (25)$$

$$P_w = \begin{pmatrix} d_1 & e_1 & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ e_1 & d_1 & e_2 & 0 & \dots & \dots & 0 \\ 0 & e_2 & d_1 & e_3 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & \dots & 0 & e_{n-3} & d_{n-2} & e_{n-2} & 0 \\ 0 & \dots & \dots & 0 & e_{n-2} & d_1 & e_{n-1} \\ 0 & \dots & \dots & \dots & 0 & e_{n-1} & d_n \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$d_i = \frac{\Delta x}{\Delta t} C_i^{j+1,k} + \frac{K_{i+1}^{j+1,k} + K_i^{j+1,k}}{2\Delta x_i} + \frac{K_i^{j+1,k} + K_{i-1}^{j+1,k}}{2\Delta x_{i-1}} \quad \text{y} \quad e_i = \frac{K_i^{j+1,k} + K_{i+1}^{j+1,k}}{2\Delta x_i}$$

$$f_i = \frac{\Delta x}{\Delta t} C_i^{j+1,k} h_i^{j+1,k} - \frac{\Delta x}{\Delta t} (\theta_i^{j+1,k} - \theta_i^j) + \frac{K_{i+1}^{j+1,k} - K_{i-1}^{j+1,k}}{2} \cos\beta - \xi_i^j \Delta x$$

Donde:

$C$ : capacidad hidráulica.

La modelación inversa parte de uno de los modelos paramétricos establecidos y de muestras experimentales, las funciones hidrodinámicas del suelo pueden determinarse mediante prueba y error, variando los parámetros de las funciones elegidas, de tal forma que éstas se ajusten de manera apropiada a los datos experimentales. La forma más apropiada para la calibración de un modelo es establecer una función objetivo la cual debe optimizarse, una de las forma más común para realizar este proceso es minimizar la sumatoria de los cuadrados de los errores residuales (Pujorlas, 2005, p. 48):

$$Sr = \sum_{i=1}^n (Pi - Oi)^2 = \sum_{i=1}^n (Ri)^2 \quad (27)$$

La ecuación (27) se puede adaptar dependiendo de los datos experimentales medidos donde Pi y Oi son los valores predichos y observados respectivamente. El modelo Hydrus 1D incorpora el algoritmo de optimización de Marquardt-Levenberg , y define la función objetivo como se muestra en la ecuación (28) (Jiří Šimůnek et al., 1998, p. 68).

$$\Phi(\beta, q_1, \dots; q_m) = \sum_{j=1}^m v_j \left( \sum_{i=1}^{n_j} w_{ij} [q_j * (t_i) - q_j(t_i, \beta)]^2 \right) \quad (28)$$

La primera parte de la ecuación (28) representa la desviación entre los valores medidos y los ajustados de las variables utilizadas, que en esta investigación se centran en el contenido volumétrico de agua y el potencial matricial del suelo. Donde m representa los diferentes conjuntos de mediciones, nj es el número de mediciones, el término  $q_j * (t_i)$  son las mediciones realizadas en cada instante ti, para cada medición j,  $\beta$  representa el vector de parámetros optimizados que dependen del modelo empleado,  $q_j(t_i, \beta)$  representa las predicciones del modelo usado con base en el vector  $\beta$ .  $v_j$  y  $w_{ij}$  son los pesos asignados a un determinado conjunto de mediciones o un punto particular, en este estudio se escoge el valor de 1 para dichos coeficientes, lo que indica que se asigna el mismo peso de ponderación a todas las medidas de contenido volumétrico de agua y de potencial.

## 7. CARACTERIZACIÓN HIDRODINÁMICA DE LA ESTRUCTURA MODELACIÓN INVERSA HYDRUS 1D

En el modelo numérico que utiliza Hydrus se debe definir en principio las condiciones de frontera, en este caso se tiene una alimentación constante de flujo, aunque en los diferentes ensayos se observó una pequeña acumulación de agua (<2 cm) sobre la capa superior de suelo esta no se considera y se supone un flujo a presión constante por escurrimiento gravitacional y capilar. Teniendo en cuenta la construcción de la descarga de la columna, la condición de frontera inferior se supone como flujo libre, lo que quiere decir que en la ecuación de Darcy se tiene un gradiente igual a -1, es decir, el flujo calculado será igual a la conductividad. En el muestreo desarrollado se encontró que la capa correspondiente a la cama de arena no alcanza la saturación y que escurre en valores de  $\theta = 0.15 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ , lo que quiere decir que se pueden presentar problemas de ascenso capilar en dicha frontera.

Para resolver el problema numérico se deben definir la geometría de la columna de suelo y dependiendo de la información disponible se precisa la función objetivo, esta queda establecida al cargar las curvas medidas dentro del motor de Hydrus. El módulo de solución inversa de Hydrus permite tener en cuenta, sea de manera separada o en conjunto, el total de las variables que se midieron en el ensayo de columna de suelo.

Resulta conveniente ingresar la información del comportamiento de la presión capilar  $h$  y del contenido volumétrico de agua  $\theta$  en función del tiempo. Se plantean varios modelos: uno en el que se ingresan los valores de la curva  $h(t)$  y algunos puntos de la curva  $\theta(t)$  dando más peso a estos últimos, principalmente en la zona donde la curva presenta más variación, teniendo en cuenta que se debe mantener un incremento constante del tiempo.

Otro modelo que se plantea es aquel en el que se ingresan los valores de la curva  $\theta(t)$  y algunos puntos de la curva  $h(t)$  dando más peso a estos últimos y finalmente, un modelo completo donde se introducen los valores de las curvas  $h(t)$  y  $\theta(t)$  completas o lo que resultaría en la curva  $h(\theta)$ . En todos los casos se ingresan los valores de  $\theta(t)$  y  $h(t)$  particulares a cada punto de medición.

El modelo inverso requiere valores semilla muy cercanos a la solución real de la ecuación de Richards, dado que la ecuación es una ecuación diferencial cuadrática es posible que la convergencia resulte en un mínimo local, es por esto recomendable iniciar desde un valor muy próximo al de la solución. Estos valores semilla se pueden predecir a prueba y error utilizando un modelo directo y suponiendo valores para los coeficientes de interés, que en este caso son  **$n$ ,  $\alpha$  y  $K_s$** .

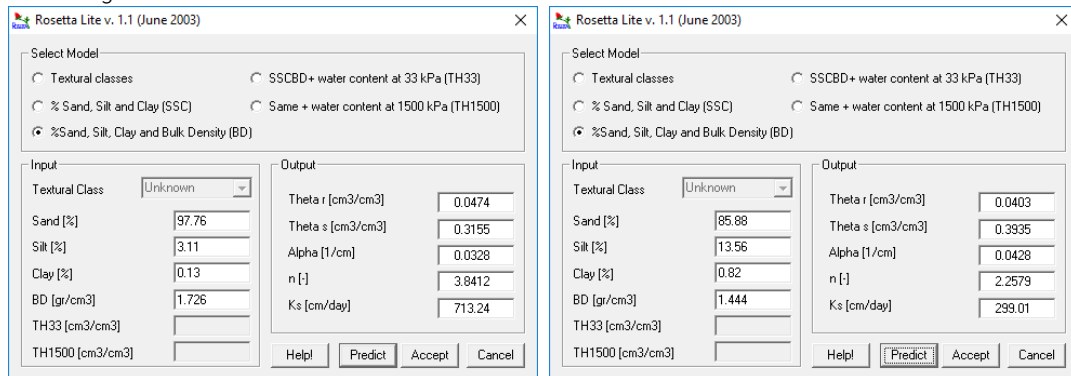
Para construir este modelo se utilizan las mediciones de laboratorio como referencia, del mismo modo, se usan los valores de  $\theta_s$  y  $\theta_r$  medidos en el laboratorio, el contenido volumétrico de saturación se fija con respecto a la porosidad del material teniendo en cuenta que en la práctica este valor será menor. Otro factor determinante para realizar la estimación inicial de parámetros es el caudal de salida, es que se debe tener el tiempo preciso en el que sale la primera gota de agua, este tiempo es importante debido a su influencia sobre el comportamiento de la curva de retención resultado del modelo directo.

En el modelo directo se recomienda variar la menor cantidad de parámetros posible. Para tener una idea del valor que tienen los parámetros iniciales se recurre a la clasificación USDA y a al módulo *Rosetta* integrado con Hydrus, se introducen los porcentajes de arcilla, limos y arenas para estimar los valores iniciales de  **$n$  y  $\alpha$** .

### 7.1. Modelo Directo para la Estimación, por Prueba y Error, de los Parámetros de van Genuchten-Mualem Semilla para el Modelo Inverso

Para la determinación de los valores semilla se utiliza el último ensayo, que corresponde al de menor caudal. Los valores semilla estimados de van Genuchten para las dos capas de suelo que conforma la columna de suelo, usando el módulo *Rosetta* son los siguientes:

Figura 92. Determinación de Parámetros de van Genuchten Usando el Modulo Rosetta

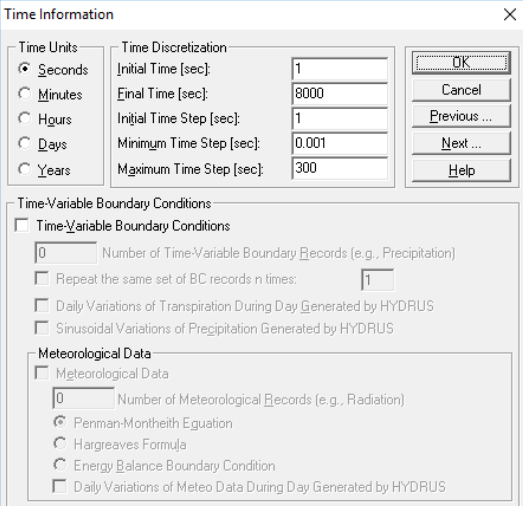
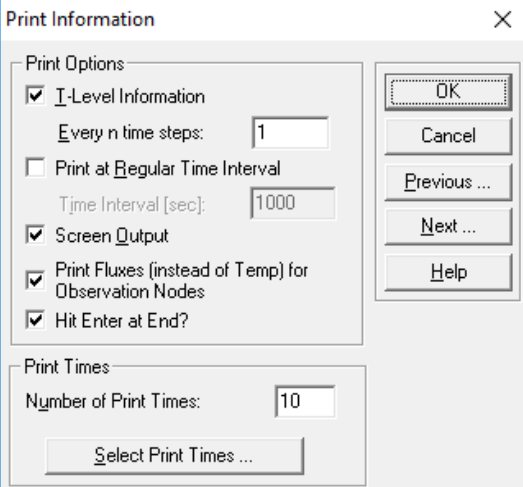
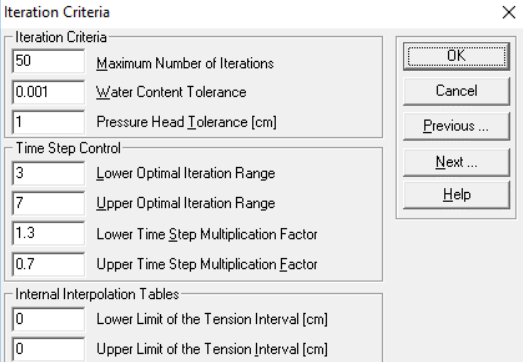


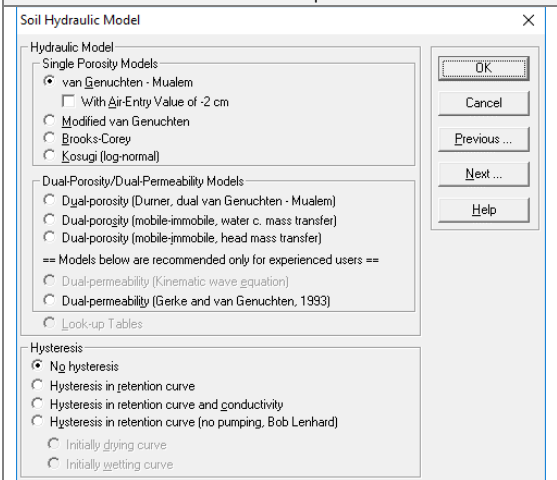
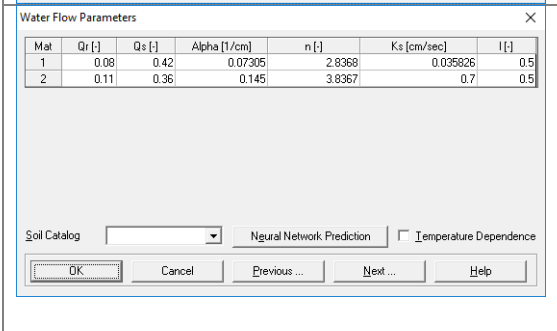
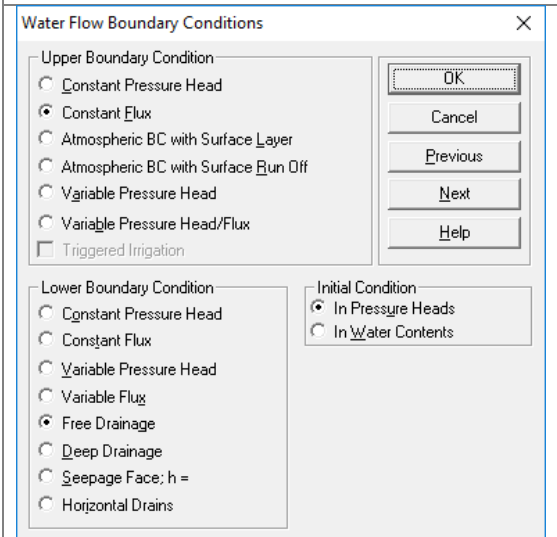
Los parámetros que se muestran en la Figura 92 son una guía y se usan para el desarrollo del modelo directo, en la Tabla 36 se describe el proceso general para la estructuración de este modelo en Hydrus 1D.

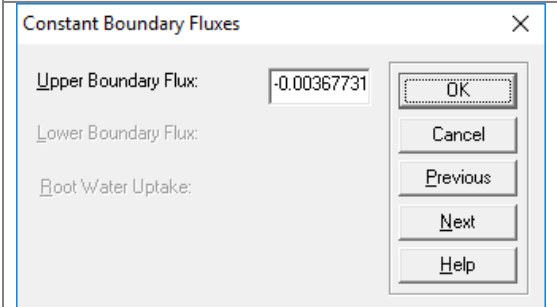
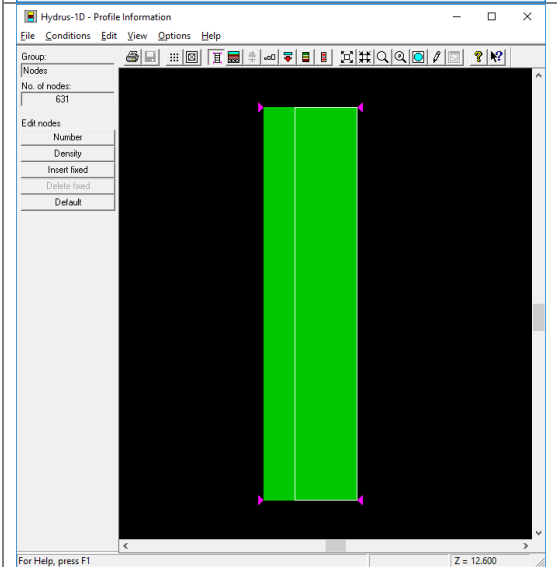
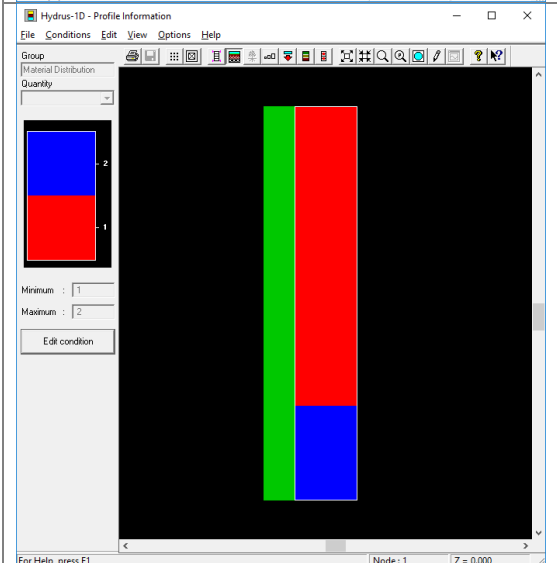
Tabla 36. Definición del Modelo Directo Inicial en Hydrus 1D.

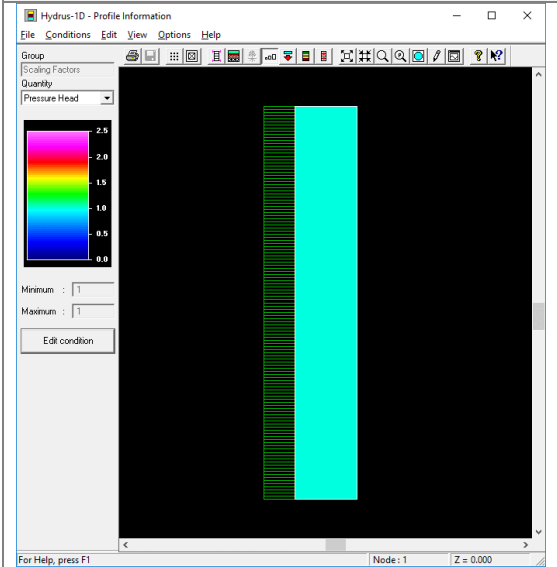
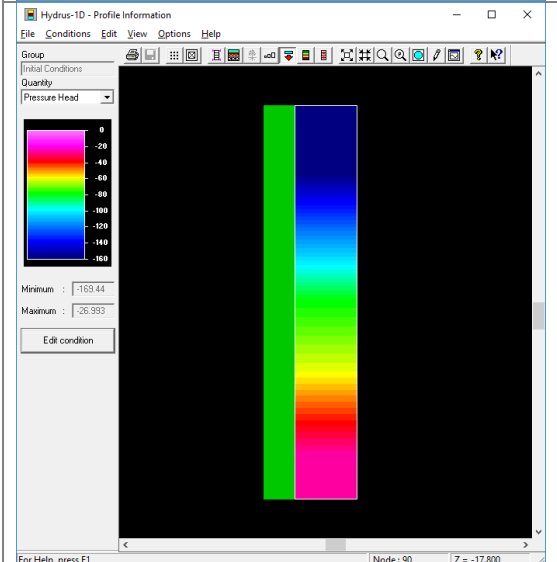
Ventana de Opciones	Criterios
	<p>Se quiere simular "Water Flow" en un modelo directo utilizando valores de referencia para encontrar los valores semilla del modelo inverso.</p>
	<p>Se selecciona cm para todas las longitudes. Se consideran dos materiales y se suponen dos capas para el balance de masas, una para el suelo de plantación y otra para la cama de arena. 1 para flujo vertical, en la representación del gradiente hidráulico se incluye la gravedad. Lo que quiere decir que en la ecuación de Richards se considera o no el término de gravedad. El valor de la altura total de la columna de suelo se mide al inicio y al final del experimento, se opta por dejar el valor promedio de estas medidas.</p>



Ventana de Opciones	Criterios
	<p>La información recopilada en el laboratorio se capturó cada segundo, se elige este intervalo para tener congruencia en los tiempos, los parámetros de tiempos de iteración, mínimo y máximos, tiempo inicial y final se eligen dependiendo de la capacidad de cálculo.</p>
	<p>Se seleccionan 10 puntos para la visualización de la información teniendo en cuenta que en esta etapa son suficientes para visualizar el comportamiento del modelo directo.</p>
	<p>El criterio de iteración, la tolerancia en la presión y en el contenido volumétrico de agua se ajustan con el objetivo de minimizar el error, en primer lugar, no se consideran las tablas de interpolación, sin embargo, es posible usarlas en algunos casos.</p>

Ventana de Opciones	Criterios																					
	<p>Se define utilizar el modelo de vG-M. sin considerar Histéresis</p>																					
 <table border="1" data-bbox="316 766 828 819"> <thead> <tr> <th>Mat</th> <th>Qr [-]</th> <th>Qz [-]</th> <th>Alpha [1/cm]</th> <th>n [-]</th> <th>Ks [cm/sec]</th> <th>l [-]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.08</td> <td>0.42</td> <td>0.07305</td> <td>2.8368</td> <td>0.035826</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.11</td> <td>0.36</td> <td>0.145</td> <td>3.8367</td> <td>0.7</td> <td>0.5</td> </tr> </tbody> </table>	Mat	Qr [-]	Qz [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/sec]	l [-]	1	0.08	0.42	0.07305	2.8368	0.035826	0.5	2	0.11	0.36	0.145	3.8367	0.7	0.5	<p>Los valores de <math>\alpha</math> y <math>n</math> son los obtenidos con la predicción de Rosetta mientras que el valor de <math>\theta_s</math> y <math>\theta_r</math> son el resultado de las mediciones en el laboratorio. El valor de <math>k_s</math> se modifica hasta que la condición de las curvas <math>\theta(t)</math> y <math>h(t)</math> corresponden o son muy cercanas al valor medido en la experimentación realizada en la columna de suelo, este proceso se realizó a prueba y error observando que el comportamiento de las curvas de salida. Otro factor que se tuvo presente fue el tiempo de salida de la primera gota de agua en la columna.</p>
Mat	Qr [-]	Qz [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/sec]	l [-]																
1	0.08	0.42	0.07305	2.8368	0.035826	0.5																
2	0.11	0.36	0.145	3.8367	0.7	0.5																
	<p>En el experimento realizado se consideraron las condiciones de descarga libre y de alimentación constante, estas condiciones se definen del mismo modo en el modelo directo.</p>																					

Ventana de Opciones	Criterios
	<p>En este campo se define el flujo de Darcy constante respectivo para cada experimento.</p>
	<p>Inicialmente se definió una grilla uniforme cada centímetro, sin embargo, en procesos posteriores se afina a 2 mm para mejorar la solución numérica.</p>
	<p>Se define la geometría de los materiales a utilizar, teniendo en cuenta la información de cotas para cada experimento.</p>

Ventana de Opciones	Criterios
	<p>El Factor de escala utilizado es de 1.</p>
	<p>La condición inicial de presión se define como la condición inicial que marca cada tensiómetro al inicio del experimento, esta condición se define interpolando las lecturas de los tensiómetros entre puntos de observación.</p>

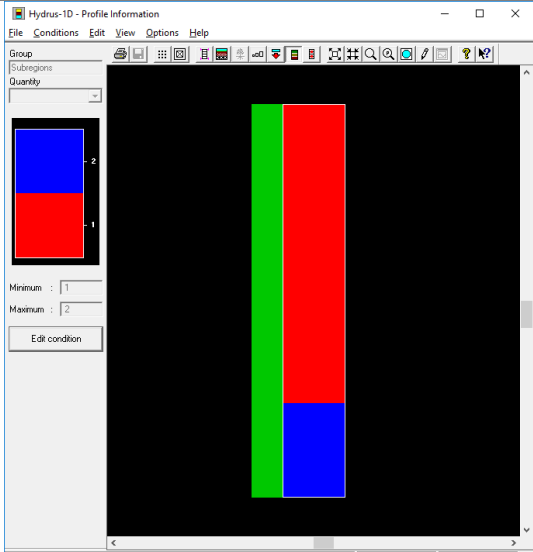
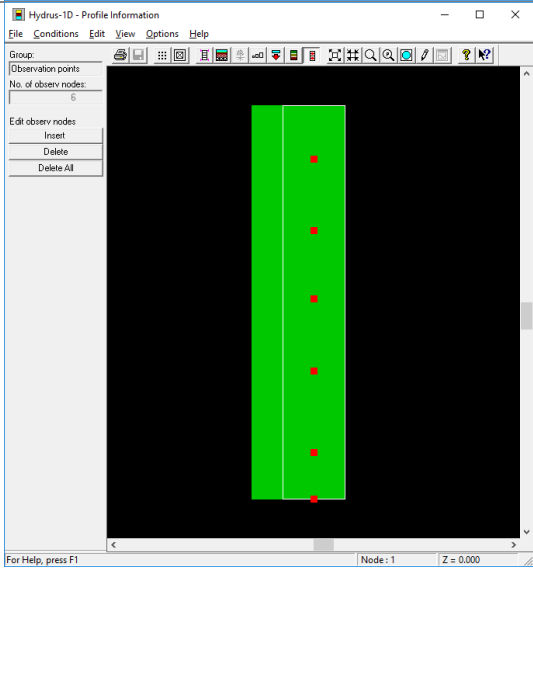
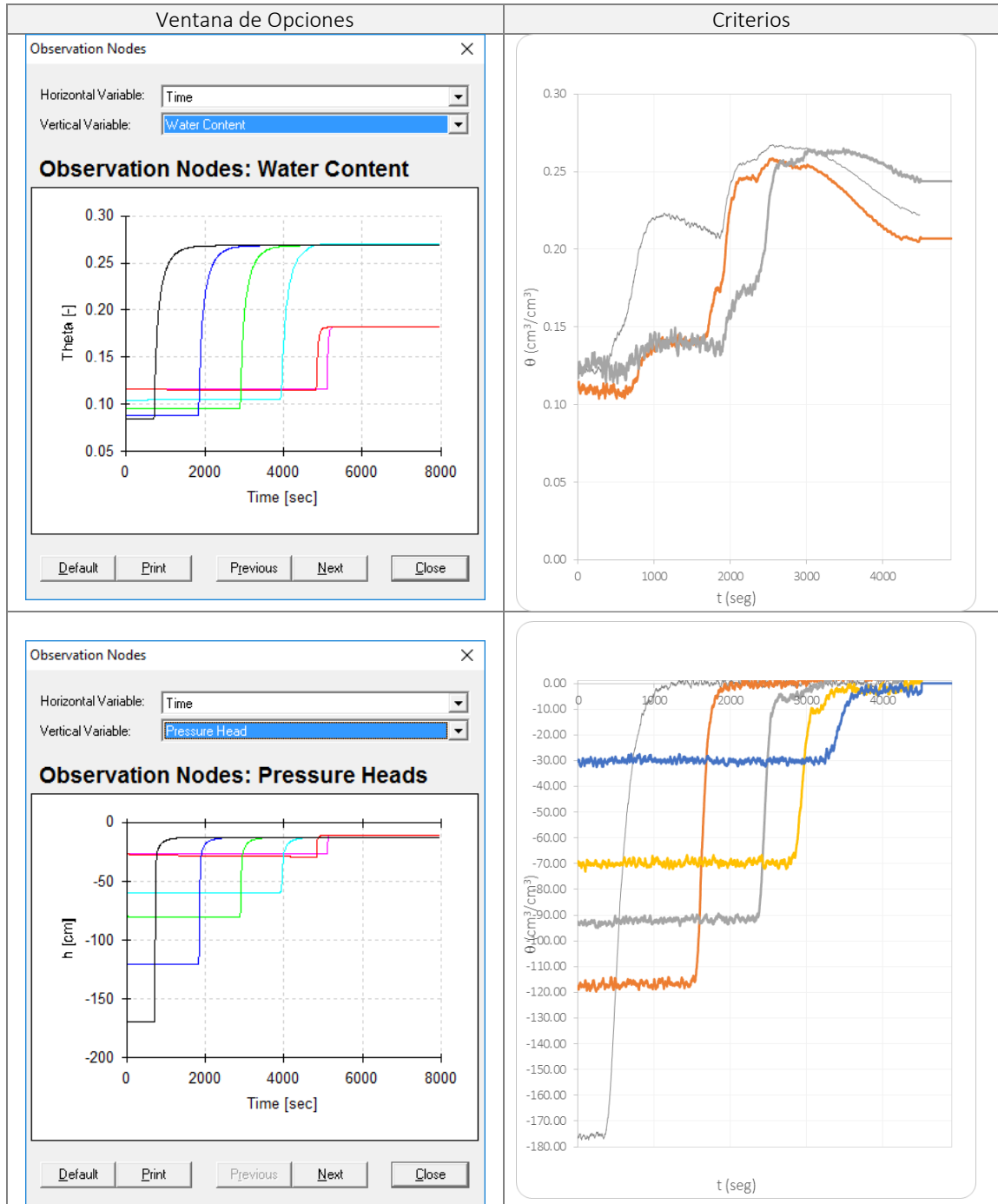
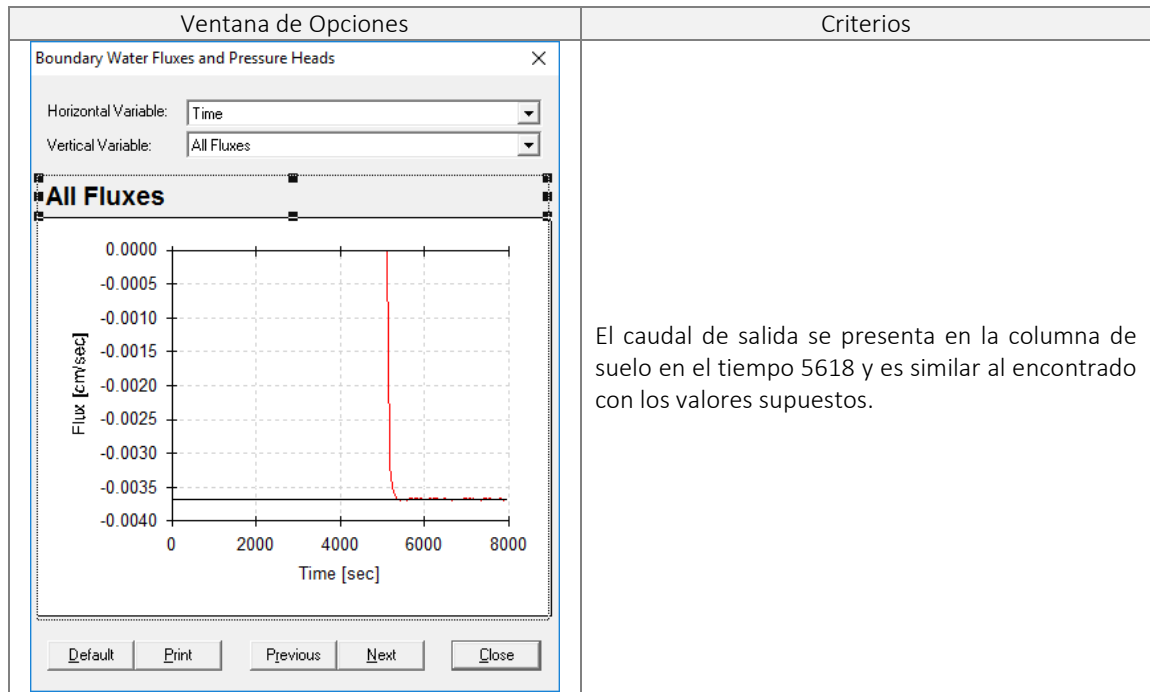
Ventana de Opciones	Criterios																								
	<p>Las subregiones para el balance de masas deben coincidir con los límites de cada suelo, de lo contrario, se presentará inestabilidad en la solución. Se definen dos sub-regiones en la frontera de cada suelo.</p>																								
	<p>Se definen 5 puntos de observación de acuerdo a la posición de estos en el modelo de columna de suelo.</p> <table border="1" data-bbox="899 919 1425 1199"> <thead> <tr> <th colspan="3">Puntos de Observación</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Cota Superior de suelo:</td> <td>0.00</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Cota Inferior del Suelo:</td> <td>126.00</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Cota Medidor ID 5</td> <td>17.00</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Cota Medidor ID 4</td> <td>40.00</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Cota Medidor ID 3</td> <td>62.00</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Cota Medidor ID 2</td> <td>85.00</td> <td>cm</td> </tr> <tr> <td>Cota Medidor ID 1</td> <td>111.00</td> <td>cm</td> </tr> </tbody> </table> <p>La definición de las cotas depende de la geometría de la columna de suelo. Debido a la acomodación del suelo dentro de la columna, la definición de la cota inferior del suelo se realiza según el promedio de nivel superior del suelo antes y después del experimento. Se decide agregar uno punto de observación en el borde inferior para visualizar el fenómeno de barrera capilar debido al cambio de presiones entre en centro de la cama de arena y la descarga libre.</p>	Puntos de Observación			Cota Superior de suelo:	0.00	cm	Cota Inferior del Suelo:	126.00	cm	Cota Medidor ID 5	17.00	cm	Cota Medidor ID 4	40.00	cm	Cota Medidor ID 3	62.00	cm	Cota Medidor ID 2	85.00	cm	Cota Medidor ID 1	111.00	cm
Puntos de Observación																									
Cota Superior de suelo:	0.00	cm																							
Cota Inferior del Suelo:	126.00	cm																							
Cota Medidor ID 5	17.00	cm																							
Cota Medidor ID 4	40.00	cm																							
Cota Medidor ID 3	62.00	cm																							
Cota Medidor ID 2	85.00	cm																							
Cota Medidor ID 1	111.00	cm																							

Tabla 37. Resultados Modelo Directo





Los resultados obtenidos con el modelo directo alcanzan valores de  $\theta$  cercanos a los medidos experimentalmente, lo mismo ocurre con la tensión  $h$ . De igual manera, el tiempo en que sale el flujo se encuentra cercano al segundo 5618 medido experimentalmente, por lo tanto, los valores supuestos son adecuados para su uso como valores semilla en los modelos inversos que se proponen para la caracterización del suelo. Este método de prueba y error es útil si se considera que el modelo inverso resuelve la misma expresión que el directo.

## 7.2. Modelo Inverso Usando Hydrus 1D

Para el modelo inverso se eligen solamente 15 puntos característicos para representar cada una de las curvas  $h(t)$  y  $\theta(t)$ , esto con el fin de cumplir las restricciones en la cantidad de elementos de la función objetivo que impone Hydrus. La selección de los puntos se realiza sobre la curva  $h(t)$ , esto se debe a que la incertidumbre en la medición de la tensión es más baja. Para la selección de los puntos se localiza el punto de inflexión de la curva y a partir de este se seleccionan varios puntos en un incremento constante tiempo hacia adelante y hacia atrás de este punto.

A partir de los puntos seleccionados de presión se busca para ese instante de tiempo al valor correspondiente de  $\theta$ . La curva  $\theta(t)$  usada en el análisis se construye teniendo en cuenta el comportamiento en  $s$  teórico que debe seguir, es decir, se desprecian los puntos que aparentemente son resultado del ruido o de otros factores.

A continuación, se muestran los datos que alimentan el modelo inverso en Hydrus 1D:

Tabla 38. Flujo de Entrada Para el Modelo Inverso

Caudal de entrada:	1.4882 ml/s
Área Transversal:	404.7078 cm <sup>2</sup>
Velocidad:	0.0036773119 cm/s

Tabla 39. Datos de Entrada: Curvas  $h(t)$ ,  $\theta(t)$  y  $h(\theta)$

H 5 / Op_1			H 4 / Op_2			H 3 / Op_3		
dt:	H (cm)	q (cm3/cm3)	dt:	H (cm)	q (cm3/cm3)	dt:	H (cm)	q (cm3/cm3)
2	-176.11	0.122	2	-117.52	0.135	2	-92.63	0.135
101	-175.62	0.122	1000	-117.47	0.135	2001	-91.45	0.135
181	-175.50	0.122	1610	-117.08	0.135	3021	-91.72	0.135
261	-176.24	0.122	1645	-115.37	0.135	3087	-90.20	0.135
341	-175.00	0.122	1680	-115.37	0.135	3153	-87.86	0.136
421	-173.64	0.122	1715	-104.20	0.135	3219	-74.61	0.136
501	-142.59	0.122	1750	-78.18	0.136	3285	-54.60	0.137
660	-62.05	0.123	1819	-37.83	0.139	3415	-19.96	0.153
740	-38.92	0.126	1854	-22.98	0.147	3481	-11.96	0.181
820	-23.33	0.133	1888	-16.54	0.157	3547	-8.09	0.213
900	-11.57	0.162	1924	-11.94	0.175	3613	-5.75	0.237
980	-8.23	0.186	1959	-9.04	0.195	3679	-3.68	0.254
1060	-4.89	0.214	1993	-7.86	0.205	3745	-4.23	0.250
2009	-0.32	0.227	3005	-1.68	0.245	4800	-0.37	0.261
7608	-0.32	0.227	7608	-0.68	0.245	7608	-0.37	0.261

H 2 / Op_4			H 1 / Op_5		
dt:	H (cm)	q (cm3/cm3)	dt:	H (cm)	q (cm3/cm3)
2	-67.83	0.150	2	-24.90	0.095
3001	-66.45	0.150	4001	-25.27	0.122
4093	-65.73	0.150	4800	-24.74	0.144
4159	-58.68	0.151	4900	-23.81	0.144
4225	-47.18	0.152	5287	-11.73	0.155
4291	-35.67	0.154	5321	-12.00	0.164
4357	-23.59	0.161	5419	-7.75	0.156
4487	-10.79	0.198	5667	-3.11	0.169
4600	-9.21	0.210	5681	-2.58	0.170
4680	-7.77	0.223	5684	-2.58	0.169
4770	-7.63	0.225	5687	-2.45	0.168
4860	-6.33	0.237	5701	-1.78	0.172
4816	-7.48	0.226	5721	-0.99	0.172
5001	-2.74	0.261	5724	-1.12	0.172
7608	-0.74	0.264	7608	-0.12	0.172



Figura 93. Curvas  $h(t)$ ,  $\theta(t)$  y  $h(\theta)$  ID-05/OP-1

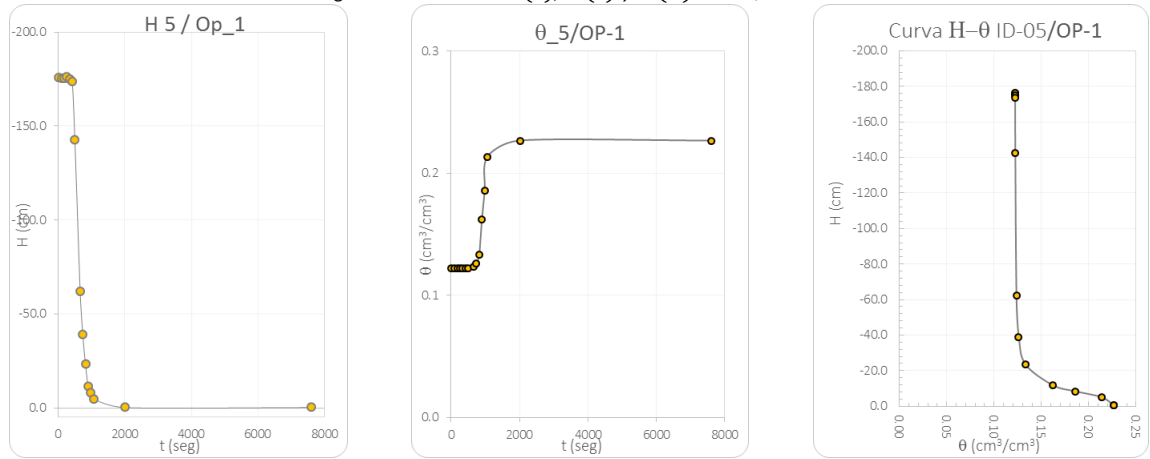


Figura 94. Curvas  $h(t)$ ,  $\theta(t)$  y  $h(\theta)$  ID-04/OP-2

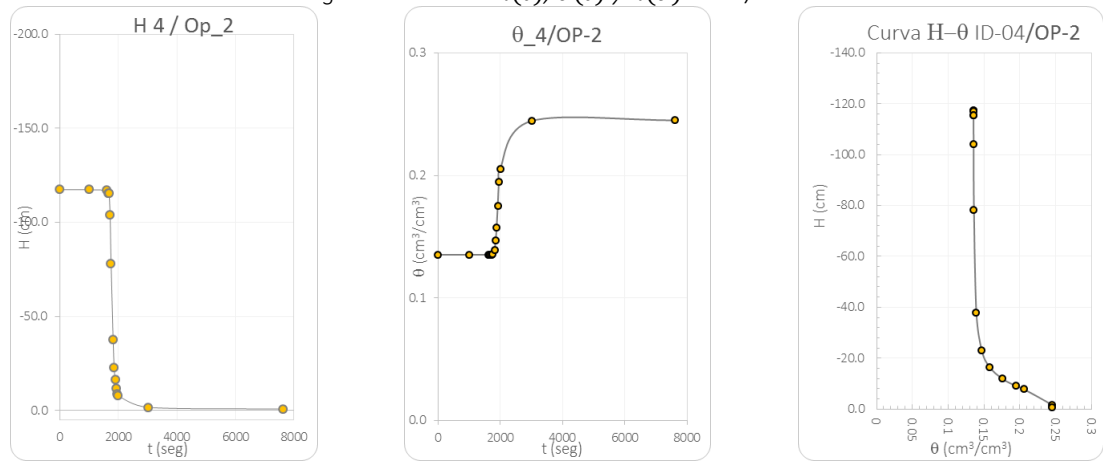


Figura 95. Curvas  $h(t)$ ,  $\theta(t)$  y  $h(\theta)$  ID-03/OP-3

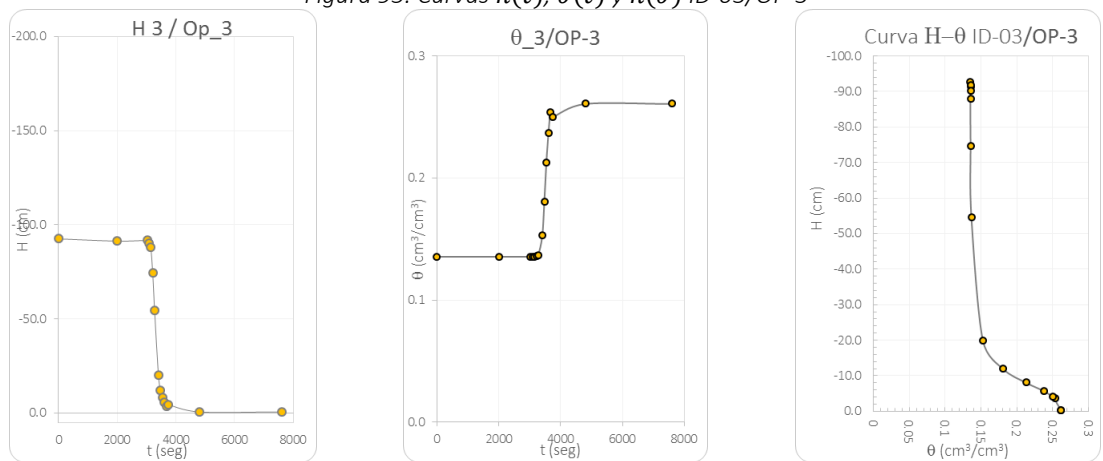


Figura 96. Curvas  $h(t)$ ,  $\theta(t)$  y  $h(\theta)$  ID-02/OP-4

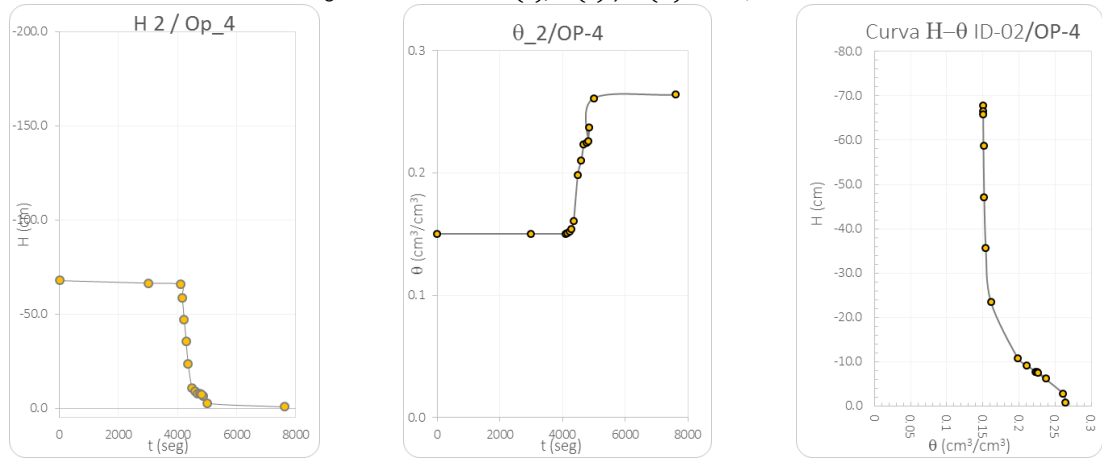


Figura 97. Curvas  $h(t)$ ,  $\theta(t)$  y  $h(\theta)$  ID-01/OP-5

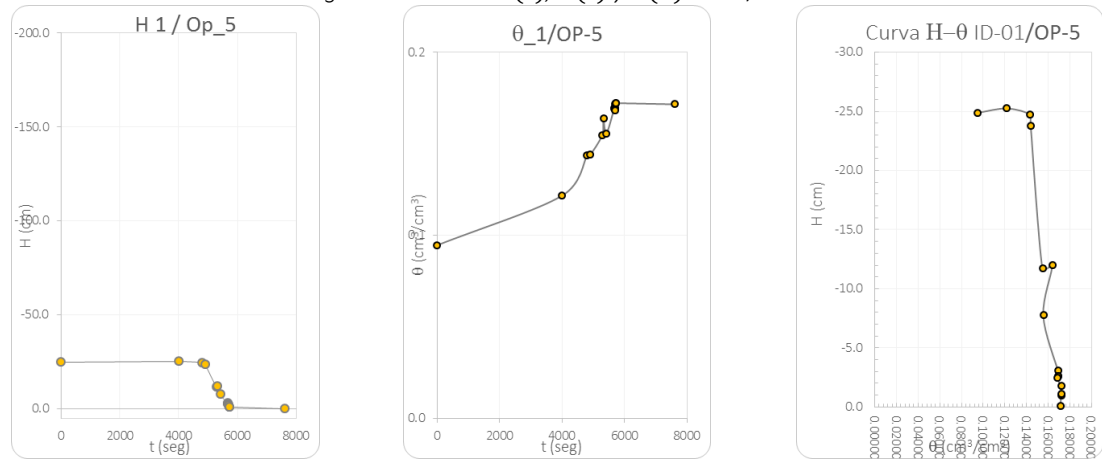
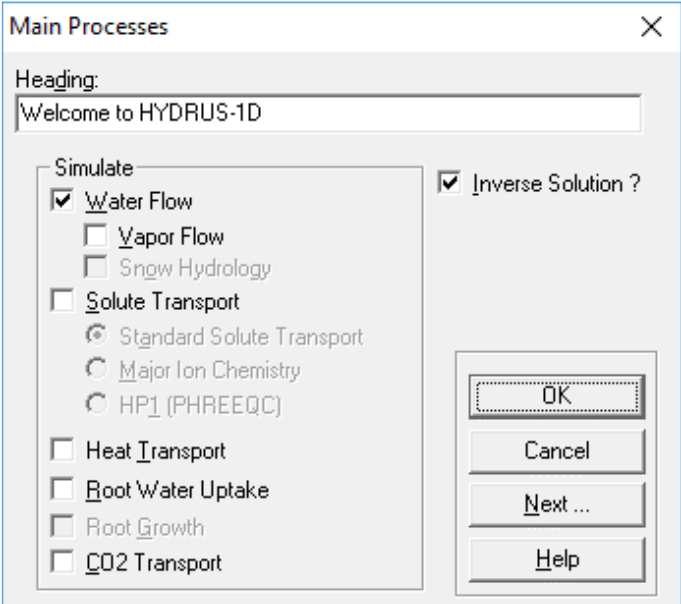
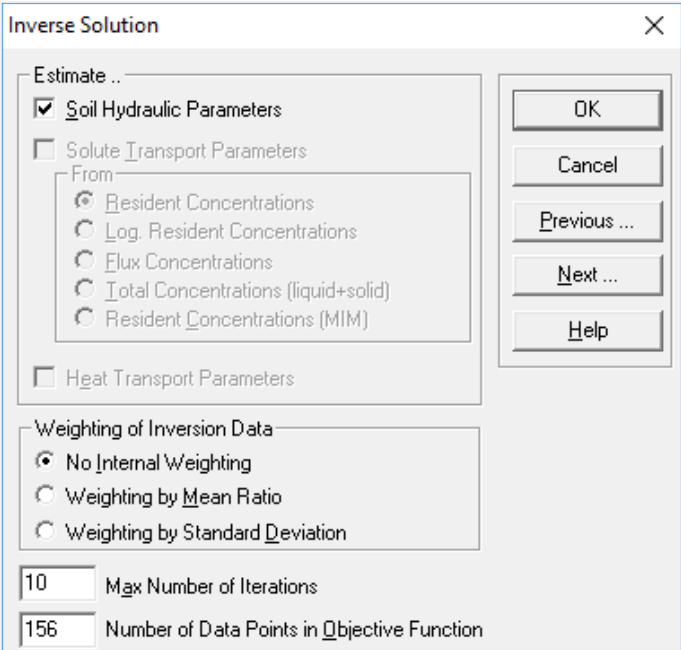
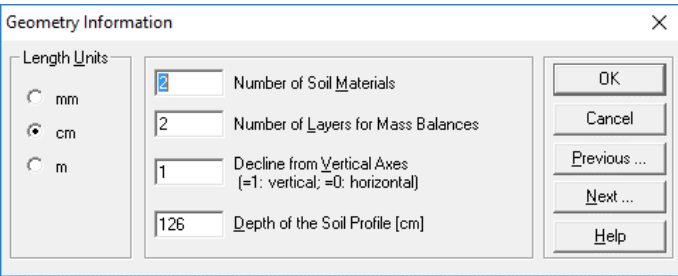
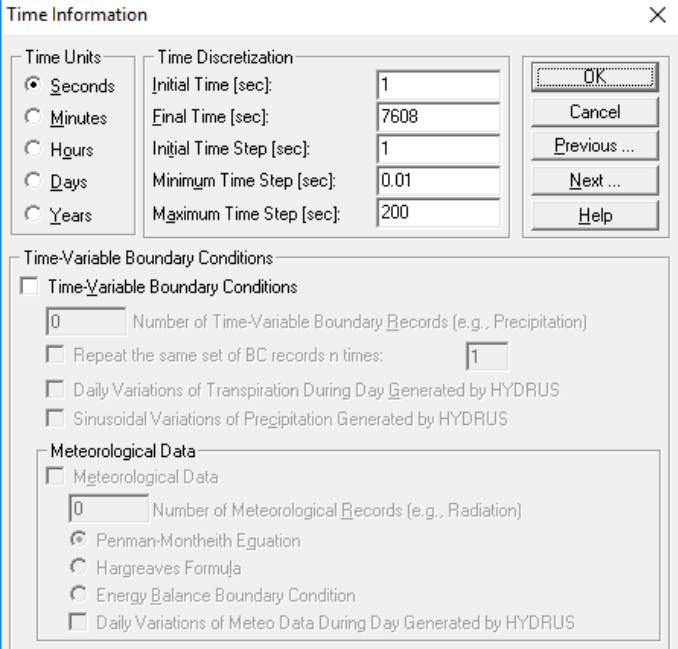
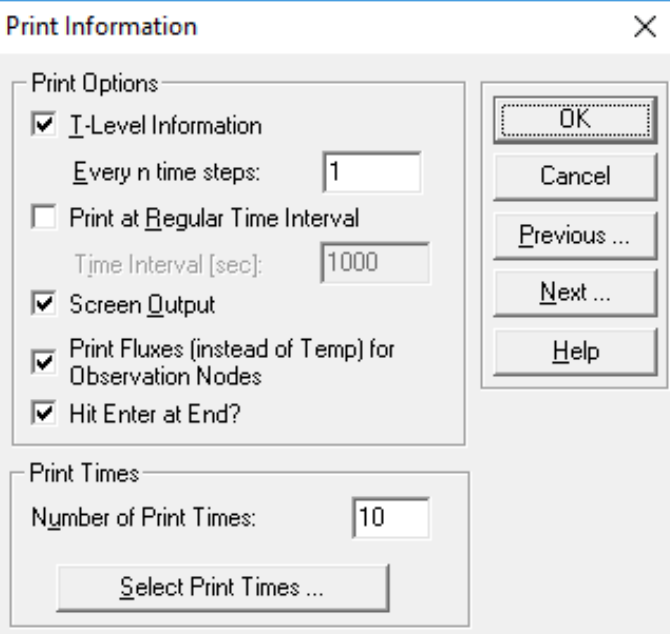
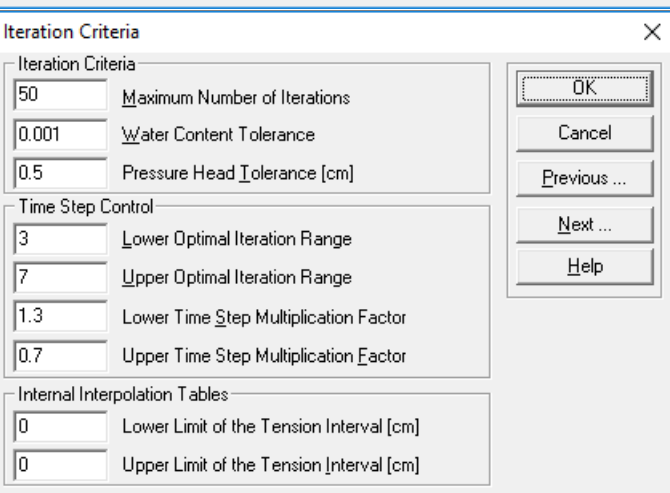


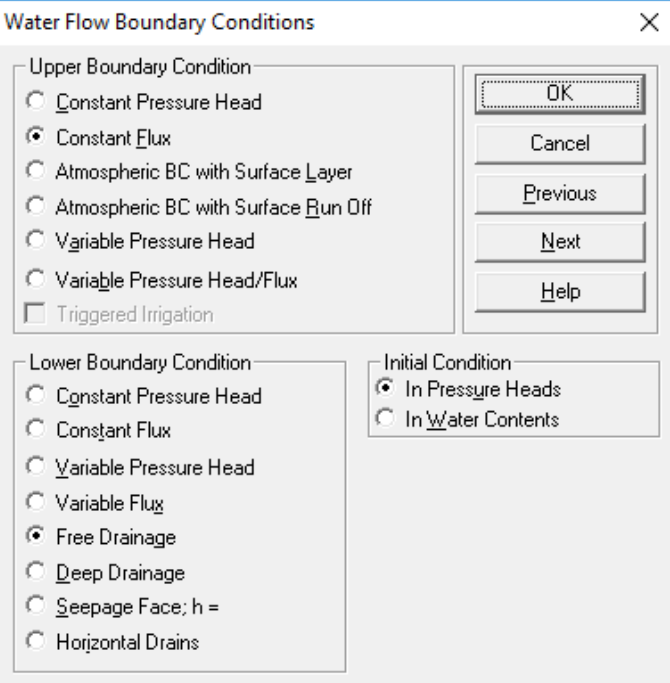
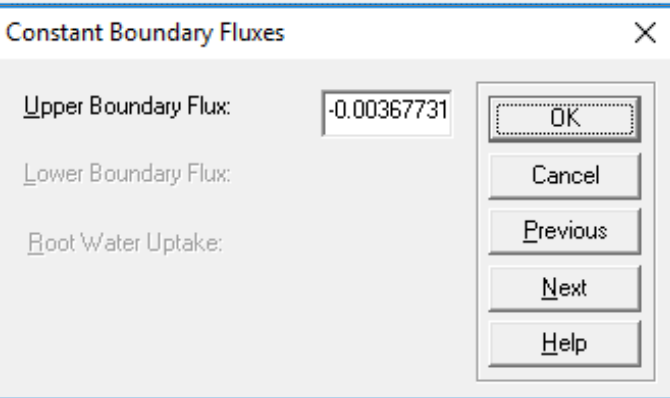
Tabla 40. Definición General del Modelo Inverso en Hydrus 1D

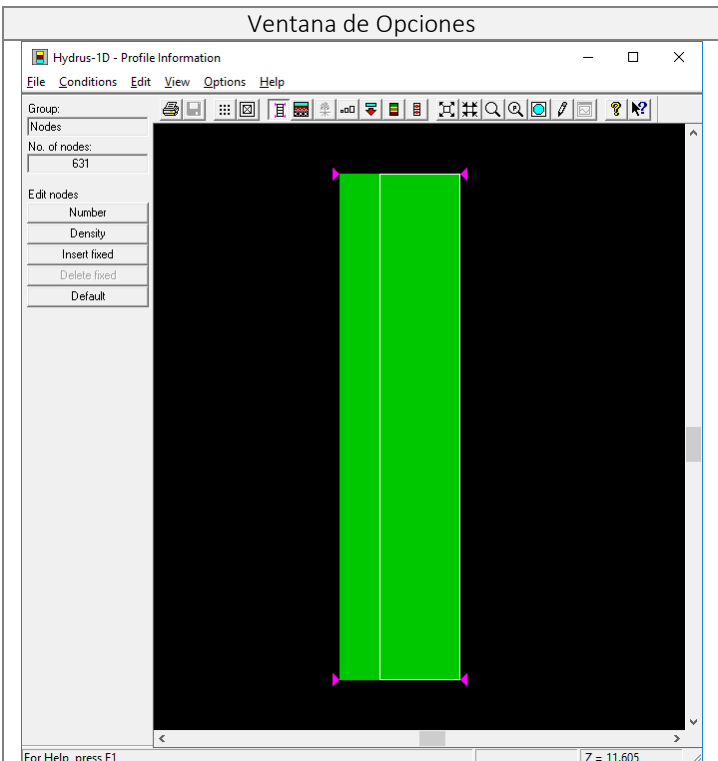
Ventana de Opciones	Criterios
 <p><b>Main Processes</b></p> <p>Heading: Welcome to HYDRUS-1D</p> <p>Simulate</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> Water Flow</li> <li><input type="checkbox"/> Vapor Flow</li> <li><input type="checkbox"/> Snow Hydrology</li> <li><input type="checkbox"/> Solute Transport             <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> Standard Solute Transport</li> <li><input type="radio"/> Major Ion Chemistry</li> <li><input type="radio"/> HP1 (PHREEQC)</li> </ul> </li> <li><input type="checkbox"/> Heat Transport</li> <li><input type="checkbox"/> Root Water Uptake</li> <li><input type="checkbox"/> Root Growth</li> <li><input type="checkbox"/> CO2 Transport</li> </ul> <p><input checked="" type="checkbox"/> Inverse Solution ?</p> <p>Buttons: OK, Cancel, Next ..., Help</p>	<p>Se quiere simular "Water Flow" y mediante un modelo inverso se quiere resolver la ecuación de Richards a partir de datos medidos en Laboratorio.</p>
 <p><b>Inverse Solution</b></p> <p>Estimate ..</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> Soil Hydraulic Parameters</li> <li><input type="checkbox"/> Solute Transport Parameters             <ul style="list-style-type: none"> <li>From                 <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> Resident Concentrations</li> <li><input type="radio"/> Log. Resident Concentrations</li> <li><input type="radio"/> Flux Concentrations</li> <li><input type="radio"/> Total Concentrations (liquid+solid)</li> <li><input type="radio"/> Resident Concentrations (MIM)</li> </ul> </li> </ul> </li> <li><input type="checkbox"/> Heat Transport Parameters</li> </ul> <p>Weighting of Inversion Data</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> No Internal Weighting</li> <li><input type="radio"/> Weighting by Mean Ratio</li> <li><input type="radio"/> Weighting by Standard Deviation</li> </ul> <p>10 Max Number of Iterations</p> <p>156 Number of Data Points in Objective Function</p> <p>Buttons: OK, Cancel, Previous ..., Next ..., Help</p>	<p>Se quiere estimar "Soil Hydraulics Parameters" y se consideran los datos seleccionados, el número de iteraciones permitido es de 10 a 50 para el cálculo de optimización. El número de parámetros en la función objetivo es variable, depende de la cantidad de datos, en este caso se tienen 156 datos.</p>

Ventana de Opciones	Criterios
	<p>Se selecciona cm para todas las longitudes. Se consideran dos materiales y se suponen dos capas para el balance de masas, una para el suelo de plantación y otra para la cama de arena. Se usa 1 para representar el flujo vertical, en la representación del gradiente hidráulico se incluye la gravedad. Lo que quiere decir que en la ecuación de Richards se considera o no el término de gravedad. El valor de la altura total de la columna de suelo se mide al inicio y al final del experimento, se opta por dejar el valor promedio de estas medidas.</p>
	<p>La información recopilada en el laboratorio se capturó en intervalos de segundos, se eligen estas unidades para tener congruencia en los tiempos, los parámetros de tiempos de iteración, mínimo y máximos, tiempo inicial y final se eligen dependiendo de la convergencia de la solución.</p>

Ventana de Opciones	Criterios
	<p>Teniendo en cuenta la cantidad de datos de entrada, se seleccionan 10 puntos para la visualización de la información este intervalo resulta adecuado. Se elige por defecto la distribución temporal de los puntos de visualización.</p>
	<p>El criterio de iteración, la tolerancia en la presión y en el contenido volumétrico de agua se ajustan con el objetivo de minimizar el error, en primer lugar, no se consideran las tablas de interpolación, sin embargo, es posible usarlas en algunos test.</p>

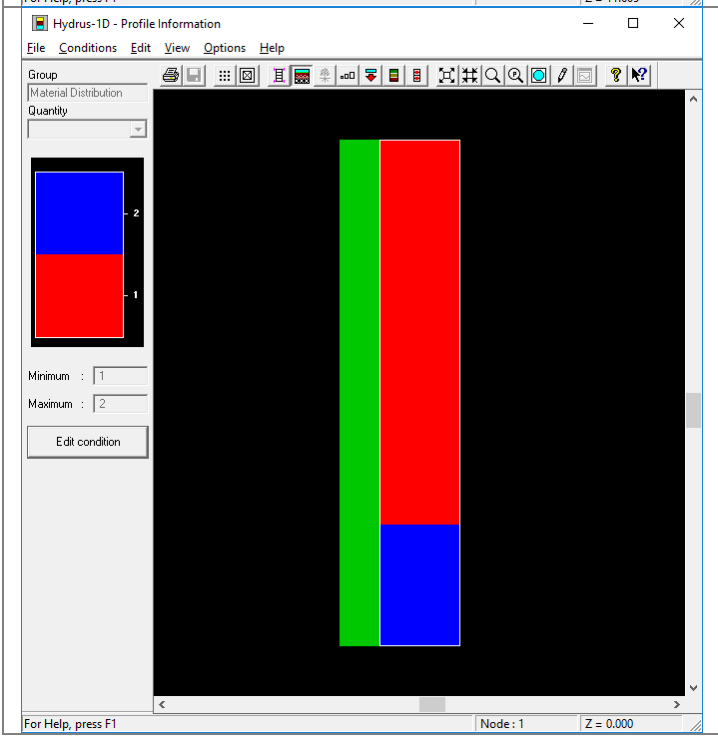
Ventana de Opciones	Criterios																																			
<p><b>Soil Hydraulic Model</b></p> <p>Hydraulic Model</p> <p>Single Porosity Models</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> van Genuchten - Mualem <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="checkbox"/> With Air-Entry Value of -2 cm</li> </ul> </li> <li><input type="radio"/> Modified van Genuchten</li> <li><input type="radio"/> Brooks-Corey</li> <li><input type="radio"/> Kosugi (log-normal)</li> </ul> <p>Dual-Porosity/Dual-Permeability Models</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Dual-porosity (Durner, dual van Genuchten - Mualem)</li> <li><input type="radio"/> Dual-porosity (mobile-immobile, water c. mass transfer)</li> <li><input type="radio"/> Dual-porosity (mobile-immobile, head mass transfer)</li> </ul> <p>== Models below are recommended only for experienced users ==</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Dual-permeability (Kinematic wave equation)</li> <li><input type="radio"/> Dual-permeability (Gerke and van Genuchten, 1993)</li> <li><input type="radio"/> Look-up Tables</li> </ul> <p>Hysteresis</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> No hysteresis</li> <li><input type="radio"/> Hysteresis in retention curve</li> <li><input type="radio"/> Hysteresis in retention curve and conductivity</li> <li><input type="radio"/> Hysteresis in retention curve (no pumping, Bob Lenhard) <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Initially drying curve</li> <li><input type="radio"/> Initially wetting curve</li> </ul> </li> </ul>	<p>Se define utilizar el modelo de vG-M. sin considerar Histéresis</p>																																			
<p><b>Water Flow Parameters - Inverse Solution - Material 1</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Qr</th> <th>Qs</th> <th>Alpha</th> <th>n</th> <th>Ks</th> <th>I</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Initial Estimate</td> <td>0.11</td> <td>0.42</td> <td>0.075</td> <td>2.6</td> <td>0.033</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>Minimum Value</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Maximum Value</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Fitted ?</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table> <p>Soil Catalog for Initial Estimate: <input type="text"/> Neural Network Prediction</p>		Qr	Qs	Alpha	n	Ks	I	Initial Estimate	0.11	0.42	0.075	2.6	0.033	0.5	Minimum Value	0	0	0	0	0	0	Maximum Value	0	0	0	0	0	0	Fitted ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<p>Se selecciona un valor inicial, es importante escogerlos muy cerca de la solución, para esto se usa el modelo directo ya estudiado anteriormente. El valor de <math>\theta_r</math> es un valor estimado a partir de datos como una asíntota, se toma un valor inferior al de equilibrio registrado. El valor de <math>\theta_s</math> se supone igual a la porosidad del material.</p>
	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	I																														
Initial Estimate	0.11	0.42	0.075	2.6	0.033	0.5																														
Minimum Value	0	0	0	0	0	0																														
Maximum Value	0	0	0	0	0	0																														
Fitted ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																														
<p><b>Water Flow Parameters - Inverse Solution - Material 2</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Qr</th> <th>Qs</th> <th>Alpha</th> <th>n</th> <th>Ks</th> <th>I</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Initial Estimate</td> <td>0.06</td> <td>0.36</td> <td>0.145</td> <td>2.6</td> <td>0.7</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>Minimum Value</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Maximum Value</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>Fitted ?</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input checked="" type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table> <p>Soil Catalog for Initial Estimate: <input type="text"/> Neural Network Prediction</p>		Qr	Qs	Alpha	n	Ks	I	Initial Estimate	0.06	0.36	0.145	2.6	0.7	0.5	Minimum Value	0	0	0	0	0	0	Maximum Value	0	0	0	0	0	0	Fitted ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<p>Los valores semilla iniciales pueden ser modificados para lograr la convergencia del modelo.</p>
	Qr	Qs	Alpha	n	Ks	I																														
Initial Estimate	0.06	0.36	0.145	2.6	0.7	0.5																														
Minimum Value	0	0	0	0	0	0																														
Maximum Value	0	0	0	0	0	0																														
Fitted ?	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																														

Ventana de Opciones	Criterios
 <p><b>Water Flow Boundary Conditions</b></p> <p>Upper Boundary Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Constant Pressure Head</li> <li><input checked="" type="radio"/> Constant Flux</li> <li><input type="radio"/> Atmospheric BC with Surface Layer</li> <li><input type="radio"/> Atmospheric BC with Surface Run Off</li> <li><input type="radio"/> Variable Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Variable Pressure Head/Flux</li> <li><input type="checkbox"/> Triggered Irrigation</li> </ul> <p>Lower Boundary Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Constant Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Constant Flux</li> <li><input type="radio"/> Variable Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Variable Flux</li> <li><input checked="" type="radio"/> Free Drainage</li> <li><input type="radio"/> Deep Drainage</li> <li><input type="radio"/> Seepage Face; h =</li> <li><input type="radio"/> Horizontal Drains</li> </ul> <p>Initial Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> In Pressure Heads</li> <li><input type="radio"/> In Water Contents</li> </ul> <p>Buttons: OK, Cancel, Previous, Next, Help</p>	<p>En el experimento realizado se consideraron las condiciones de descarga libre y de alimentación constante.</p>
 <p><b>Constant Boundary Fluxes</b></p> <p>Upper Boundary Flux: <input type="text" value="-0.00367731"/></p> <p>Lower Boundary Flux: <input type="text"/></p> <p>Root Water Uptake: <input type="text"/></p> <p>Buttons: OK, Cancel, Previous, Next, Help</p>	<p>En este campo se define el flujo constante respectivo a cada experimento. Se debe ingresar la velocidad del flujo.</p>



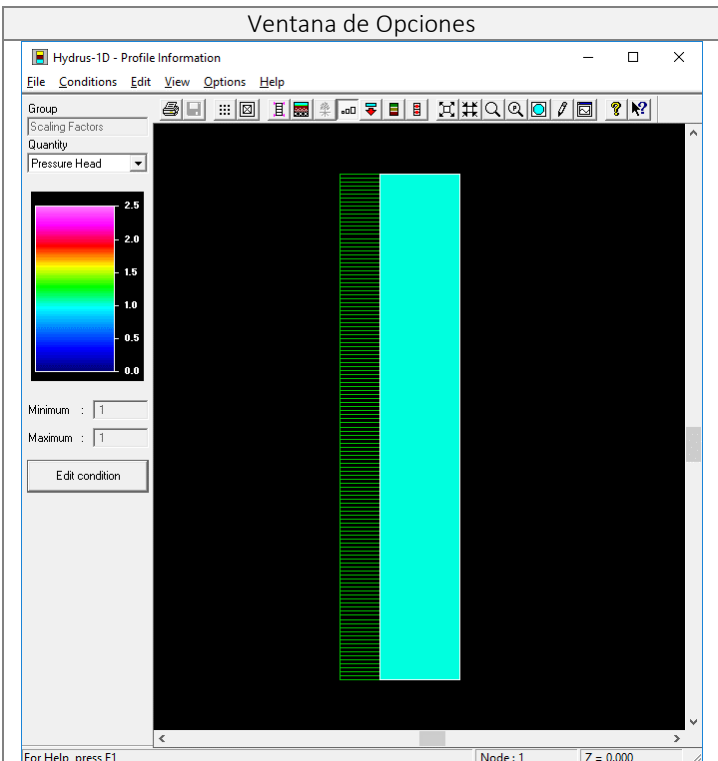
Criterios

Inicialmente se define una grilla uniforme cada centímetro, sin embargo, en procesos posteriores se afina la grilla a 2 mm.



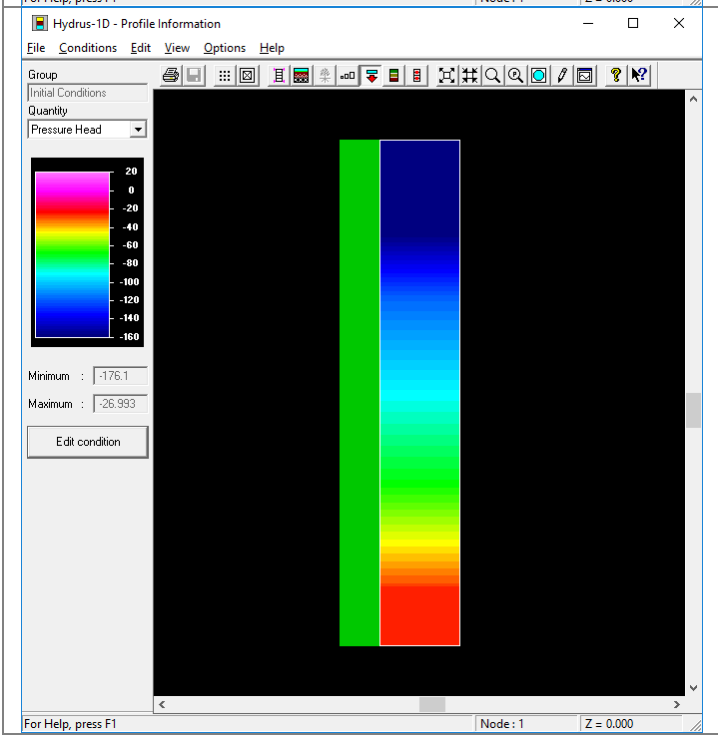
Se define la geometría de los materiales a utilizar, teniendo en cuenta la información de cotas para cada experimento, el material 1 y material 2 corresponden al suelo de plantación y cama de arena, respectivamente.



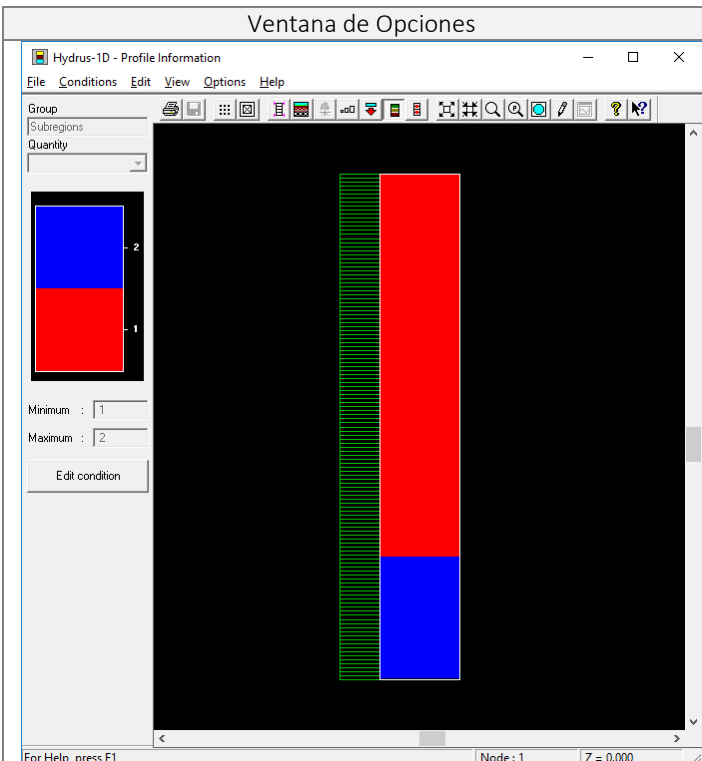


Criterios

El Factor de escala utilizado es de 1.

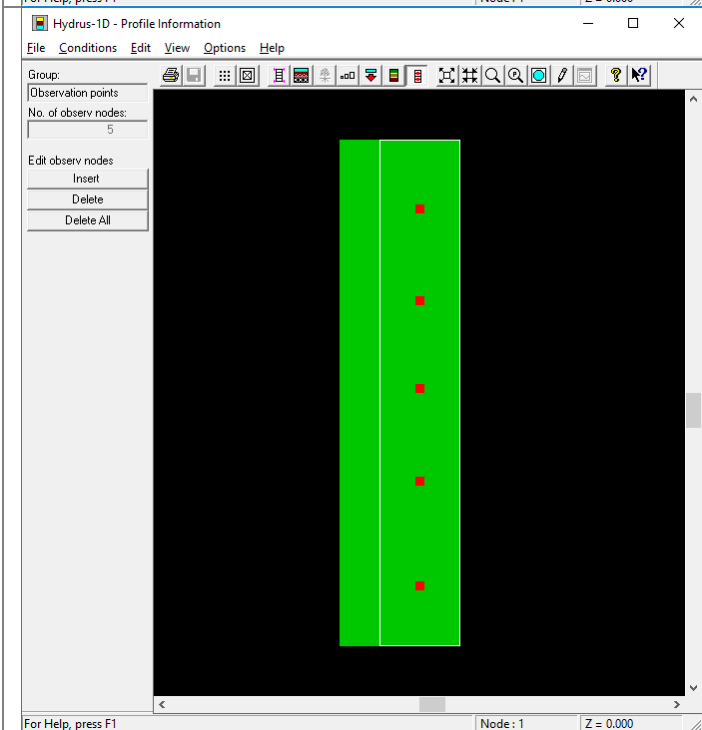


La condición inicial de presión se define como la condición inicial que marca cada tensiómetro al inicio del experimento, esta condición se define entre las mitades de los puntos de observación.



**Criterios**

Las subregiones para el balance de masas deben coincidir con los límites de cada suelo, de lo contrario se presentará inestabilidad en la solución. Se definen dos sub-regiones en la frontera de cada suelo.



Se definen 5 puntos de observación de acuerdo a la posición de estos en el modelo de columna de suelo.

Puntos de Observación		
Cota Superior de suelo:	0.00	cm
Cota Inferior del Suelo:	126.00	cm
Cota Medidor ID 5	17.00	cm
Cota Medidor ID 4	40.00	cm
Cota Medidor ID 3	62.00	cm
Cota Medidor ID 2	85.00	cm
Cota Medidor ID 1	111.00	cm

La definición de las cotas depende de la geometría de la columna de suelo. Debido a la acomodación del suelo dentro de la columna, la definición de la cota inferior del suelo se realiza según el promedio de nivel superior del suelo antes y después del experimento.

La matriz que define la función objetivo se compone con los datos de caudal de entrada, caudal de salida y las mediciones de las Curvas  $h(t)$  y  $\theta(t)$ . La matriz de datos se muestra en Tabla 41.

Tabla 41. Datos de Entrada para el Modelo Inverso

Matriz de datos para solución inversa					
156	Tiempo	H/θ/Caudal	Tipo	punto de observación	Para el balance
ID	X	Y	Type	Position	Weigth
1	2	-176.10504	1	1	2
2	101	-175.62234	1	1	2
3	181	-175.49863	1	1	2
4	261	-176.24093	1	1	2
5	341	-175.00376	1	1	2
6	421	-173.64287	1	1	2
7	501	-142.58990	1	1	2
8	660	-62.05014	1	1	3
9	740	-38.91506	1	1	3
10	820	-23.32671	1	1	3
11	900	-11.57360	1	1	5
12	980	-8.23324	1	1	5
13	1060	-4.89288	1	1	5
14	2009	-0.31535	1	1	5
15	7608	-0.31535	1	1	8
16	2	-117.51694	1	2	2
17	1000	-117.47169	1	2	2
18	1610	-117.07741	1	2	2
19	1645	-115.36886	1	2	2
20	1680	-115.36886	1	2	2
21	1715	-104.19756	1	2	2
22	1750	-78.17502	1	2	2
23	1819	-37.82692	1	2	3
24	1854	-22.97567	1	2	3
25	1888	-16.53575	1	2	3
26	1924	-11.93580	1	2	5
27	1959	-9.04441	1	2	5
28	1993	-7.86157	1	2	5
29	3005	-1.68450	1	2	5
30	7608	-0.68450	1	2	8
31	2	-92.62915	1	3	2
32	2001	-91.44597	1	3	2
33	3021	-91.72197	1	3	2
34	3087	-90.20397	1	3	2
35	3153	-87.85797	1	3	2
36	3219	-74.60995	1	3	2
37	3285	-54.59993	1	3	2
38	3415	-19.96189	1	3	3
39	3481	-11.95788	1	3	3
40	3547	-8.09387	1	3	3
41	3613	-5.74787	1	3	5
42	3679	-3.67787	1	3	5
43	3745	-4.22987	1	3	5
44	4800	-0.36586	1	3	5
45	7608	-0.36586	1	3	8
46	2	-67.82554	1	4	2
47	3001	-66.45099	1	4	2
48	4093	-65.73189	1	4	2
49	4159	-58.68468	1	4	2
50	4225	-47.17904	1	4	2

Matriz de datos para solución inversa					
156	Tiempo	H/θ/Caudal	Tipo	punto de observación	Para el balance
ID	X	Y	Type	Position	Weigth
51	4291	-35.67340	1	4	2
52	4357	-23.59248	1	4	2
53	4487	-10.79246	1	4	3
54	4600	-9.21043	1	4	3
55	4680	-7.77223	1	4	3
56	4770	-7.62841	1	4	5
57	4860	-6.33402	1	4	5
58	4816	-7.48459	1	4	5
59	5001	-2.73851	1	4	5
60	7608	-0.73851	1	4	8
61	2	-24.89676	1	5	2
62	4001	-25.26800	1	5	2
63	4800	-24.73727	1	5	2
64	4900	-23.80848	1	5	2
65	5287	-11.73428	1	5	2
66	5321	-11.99965	1	5	2
67	5419	-7.75378	1	5	2
68	5667	-3.10985	1	5	3
69	5681	-2.57912	1	5	3
70	5684	-2.57912	1	5	3
71	5687	-2.44643	1	5	5
72	5701	-1.78302	1	5	5
73	5721	-0.98692	1	5	5
74	5724	-1.11960	1	5	5
75	7608	-1.11960	1	5	8
76	2	0.12218	2	1	1
77	101	0.12218	2	1	1
78	181	0.12218	2	1	1
79	261	0.12218	2	1	1
80	341	0.12218	2	1	1
81	421	0.12218	2	1	1
82	501	0.12227	2	1	1
83	660	0.12349	2	1	1
84	740	0.12590	2	1	1
85	820	0.13306	2	1	1
86	900	0.16231	2	1	1
87	980	0.18564	2	1	1
88	1060	0.21356	2	1	1
89	2009	0.22669	2	1	1
90	7608	0.22669	2	1	5
91	2	0.13508	2	2	1
92	1000	0.13508	2	2	1
93	1610	0.13508	2	2	1
94	1645	0.13509	2	2	1
95	1680	0.13509	2	2	1
96	1715	0.13519	2	2	1
97	1750	0.13563	2	2	1
98	1819	0.13901	2	2	1
99	1854	0.14669	2	2	1
100	1888	0.15749	2	2	1
101	1924	0.17516	2	2	1

Matriz de datos para solución inversa					
156	Tiempo	H/θ/Caudal	Tipo	punto de observación	Para el balance
ID	X	Y	Type	Position	Weigth
102	1959	0.19489	2	2	1
103	1993	0.20515	2	2	1
104	3005	0.24454	2	2	1
105	7608	0.24511	2	2	5
106	2	0.13544	2	3	1
107	2001	0.13546	2	3	1
108	3021	0.13545	2	3	1
109	3087	0.13548	2	3	1
110	3153	0.13553	2	3	1
111	3219	0.13588	2	3	1
112	3285	0.13699	2	3	1
113	3415	0.15285	2	3	1
114	3481	0.18086	2	3	1
115	3547	0.21291	2	3	1
116	3613	0.23733	2	3	1
117	3679	0.25383	2	3	1
118	3745	0.25034	2	3	1
119	4800	0.26106	2	3	1
120	7608	0.26106	2	3	5
121	2	0.15038	2	4	1
122	3001	0.15044	2	4	1
123	4093	0.15047	2	4	1
124	4159	0.15086	2	4	1
125	4225	0.15190	2	4	1
126	4291	0.15415	2	4	1
127	4357	0.16091	2	4	1
128	4487	0.19833	2	4	1
129	4600	0.21035	2	4	1
130	4680	0.22329	2	4	1
131	4770	0.22466	2	4	1
132	4860	0.23709	2	4	1
133	4816	0.22603	2	4	1
134	5001	0.26133	2	4	1
135	7608	0.26406	2	4	5
136	2	0.09460	2	5	1
137	4001	0.12169	2	5	1
138	4800	0.14350	2	5	1
139	4900	0.14389	2	5	1
140	5287	0.15478	2	5	1
141	5321	0.16382	2	5	1
142	5419	0.15554	2	5	1
143	5667	0.16910	2	5	1
144	5681	0.16958	2	5	1
145	5684	0.16940	2	5	1
146	5687	0.16826	2	5	1
147	5701	0.17191	2	5	1
148	5721	0.17197	2	5	1
149	5724	0.17219	2	5	1
150	7608	0.17155	2	5	1
151	5225	-0.0002224	3	2	1
152	5575	-0.0007660	3	2	1

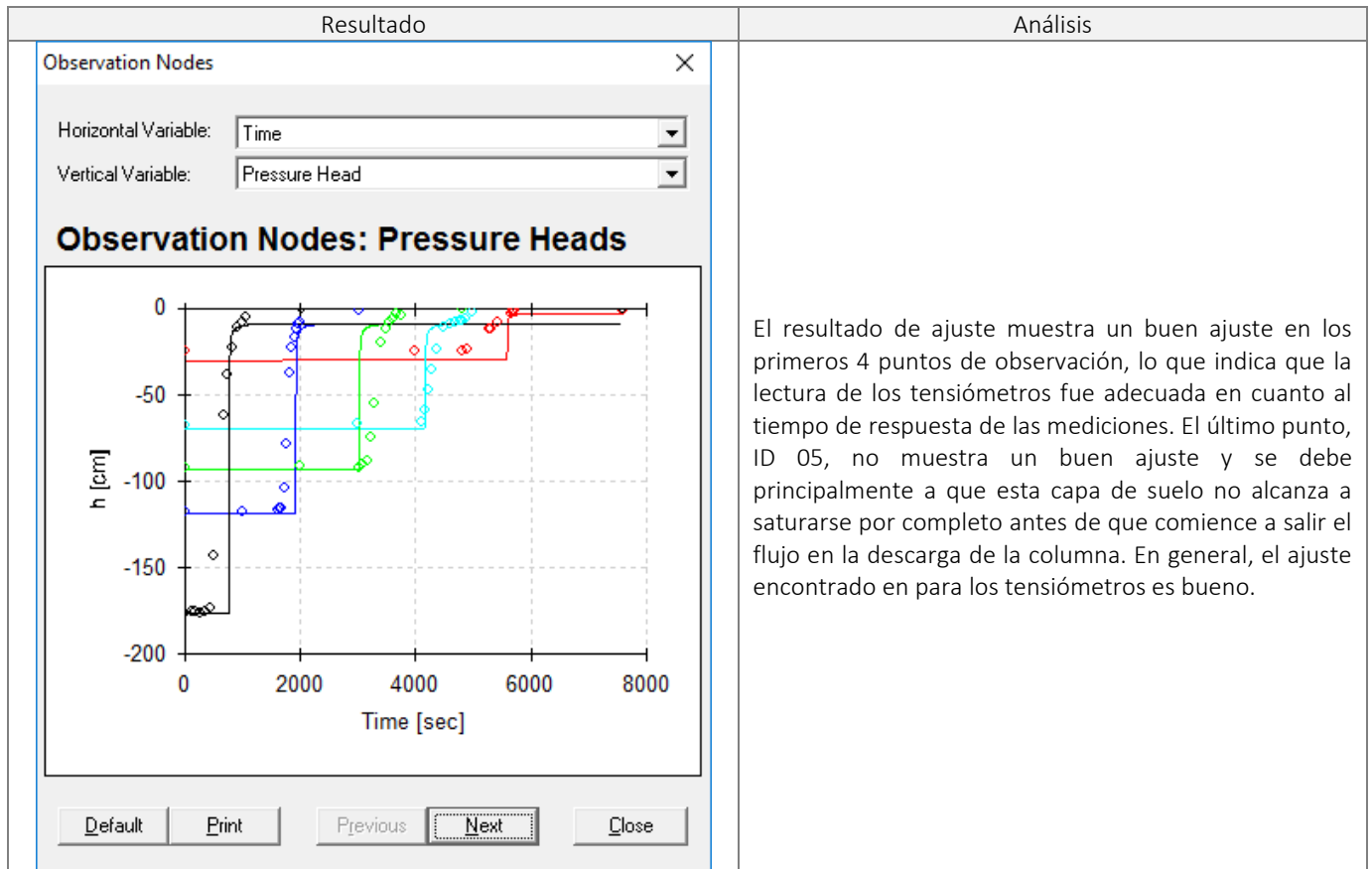
Matriz de datos para solución inversa					
156	Tiempo	H/θ/Caudal	Tipo	punto de observación	Para el balance
ID	X	Y	Type	Position	Weight
153	5975	-0.0022238	3	2	1
154	6425	-0.0027427	3	2	1
155	6925	-0.0036570	3	2	5
156	7475	-0.0036773	3	2	5

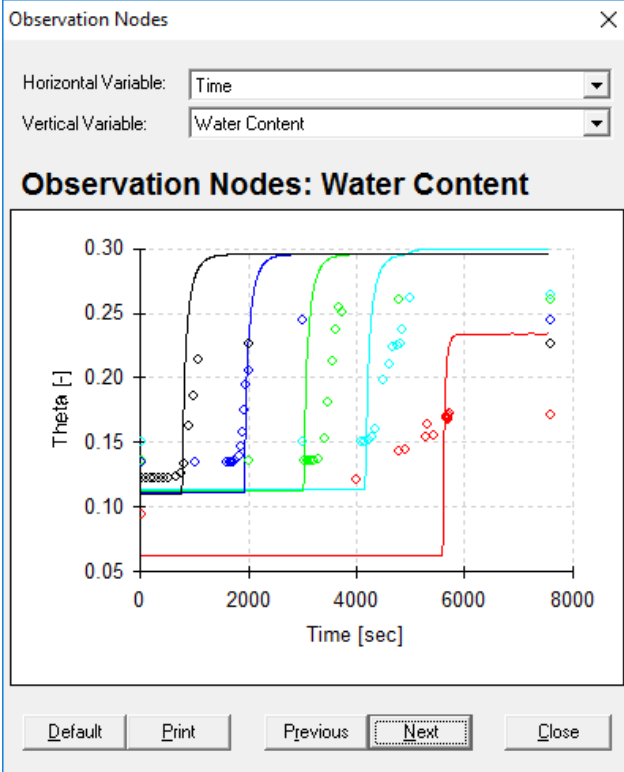
En la función objetivo se tiene en cuenta un mayor peso en algunas mediciones con el propósito de forzar al modelo a un mejor ajuste teniendo en cuenta que la mayor relevancia principalmente se encuentra en comportamiento de las presiones y el caudal de salida. Estos pesos se ajustan paso a paso por prueba y error hasta lograr un adecuado ajuste del modelo.

### 7.3. Resultados del Modelo Inverso Utilizando Curva $h(t)$ , Curva $\theta(t)$ y Caudal de Salida

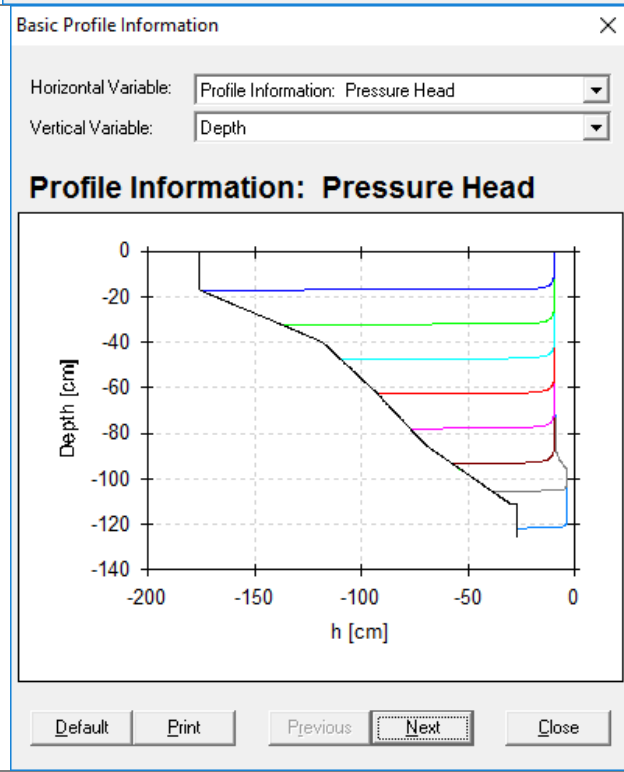
Es importante realizar un análisis general de los estadísticos que acompañan la solución inversa, estos parámetros indican, entre otras cosas, la calidad del ajuste del modelo con los datos experimentales. El modelo inverso arrojó los resultados que se muestran en la Tabla 42.

Tabla 42. Resultados del Modelo Inverso





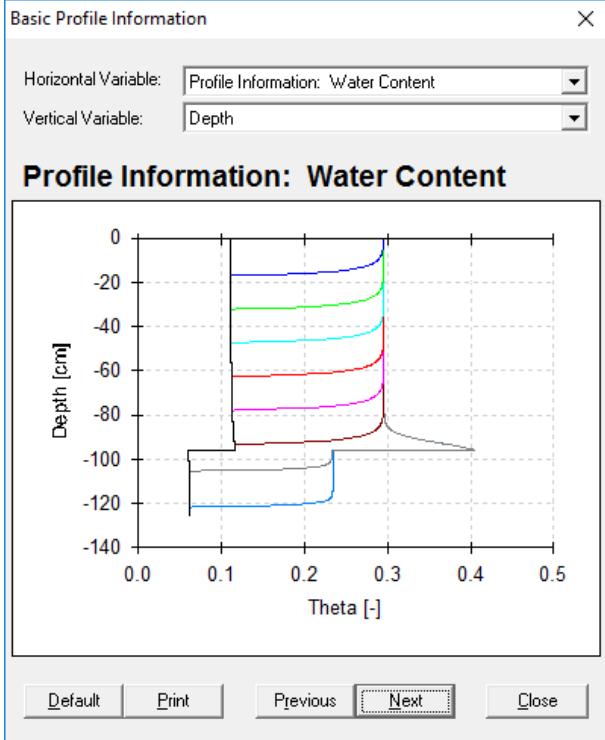
Las curvas de contenido volumétrico de agua en los diferentes puntos de observación muestran que el suelo no alcanza a saturarse, sin embargo, este resultado es contrario a lo que indican los tensiómetros. Es posible que los medidores de humedad no sean precisos en la frontera próxima a la saturación, algo que se evidenció en el proceso de calibración donde se encontró que, para un aumento en el contenido volumétrico de agua, cercano al de saturación, el medidor marcaba el mismo valor de voltaje, es decir, el instrumento no es confiable en valores cercanos a la saturación. Otro posible punto de discusión es el hecho de suponer  $\theta_s$  igual a la porosidad, lo cual no es cierto totalmente, aunque sí se ha demostrado que  $\theta_s$  es un valor muy cercano a este. El ajuste de las variaciones de  $\theta$  entre 0.13-0.23 se puede decir que son adecuados y representan claramente el comportamiento del flujo en términos del contenido volumétrico de agua.



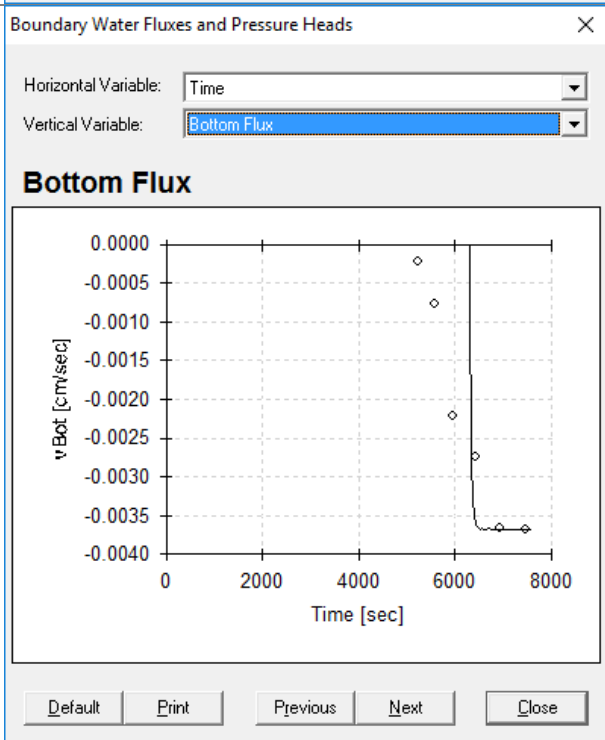
El comportamiento del frente de humedad que avanza es adecuado, mostrando que el suelo estuvo próximo a alcanzar los niveles de saturación en las capas inferiores de suelo.

Resultado

Análisis



Se observa claramente un comportamiento de barrera capilar entre las dos capas de suelo, ambas capas de suelo alcanzan valores cercanos a la saturación, que como se discutió anteriormente, es posible que se deba a la incertidumbre en la medición de  $q$  para valores cercanos a la saturación.



La descarga en la columna es en principio transitoria, el ajuste que se observa es adecuado si se tiene en cuenta que se alcanzó la condición de flujo permanente y este es un factor importante en la calibración. En el experimento se observó que comenzó a salir agua de la columna antes de que la cama de arena alcanzara su equilibrio, es decir, en principio se tiene un flujo transitorio muy marcado, con lo que se debe confiar en el valor final para la condición de flujo permanente.



Resultado	Análisis																																																	
<p>Non-linear least-squares analysis: final results</p> <pre> ===== Variable      Value      S.E.Coeff.      95% Confidence limits               Lower      Upper ALPHA      0.11282E+00  0.25883E-01  0.61678E-01  0.16397E+00 N          0.31174E+01  0.59208E+00  0.19474E+01  0.42873E+01 CONDS      0.38803E-01  0.95684E-02  0.19896E-01  0.57710E-01 ALPHA      0.28148E+00  0.52869E+00  -0.76320E+00  0.13262E+01 N          0.33389E+01  0.11564E+02  -0.19512E+02  0.26190E+02 CONDS      0.39299E-01  0.29667E+00  -0.54691E+00  0.62551E+00 </pre>	<p>Un valor alto de n indica que el suelo tiene un gran contenido de arena, lo que corresponde al suelo utilizado que tienen un 85% de arena, de acuerdo a la clasificación USDA. Para suelos con un contenido de arena alto el valor de n es difícil de determinar, el flujo característico es un flujo muy poco difuso, muy cercano a un flujo tipo pistón, y esto se refleja claramente en las curvas h y <math>\theta</math> resultado de la simulación. Los valores de <math>\alpha</math> y Ks son adecuadas para el suelo de estudio.</p> <p>De acuerdo a los valores encontrados para cada suelo se puede inferir que son suelos bien diferenciados, esto se verá claramente en la matriz de correlación del análisis inverso.</p>																																																	
<p>Mass balance error in FE solution during final run was 0.0027 %</p>	<p>El error del balance de masa es un indicativo que no ofrece mucha información respecto al ajuste de modelo, generalmente es un valor muy bajo, en este caso este error está dentro de lo esperado.</p>																																																	
<p>Correlation matrix</p> <pre> =====       1      2      3      4      5      6 1  1.0000 2 -0.2403  1.0000 3  0.4667 -0.9697  1.0000 4 -0.0626  0.0106 -0.0254  1.0000 5  0.0060 -0.0014  0.0028 -0.6703  1.0000 6 -0.0444  0.0073 -0.0179  0.5097 -0.5904  1.0000 </pre> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Alpha_1</th> <th>n_1</th> <th>Conds_1</th> <th>Alpha_2</th> <th>n_2</th> <th>Conds_2</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <th>Alpha_1</th> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>n_1</th> <td>-0.2403</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>Conds_1</th> <td>0.4667</td> <td>-0.9697</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>Alpha_2</th> <td>-0.0626</td> <td>0.0106</td> <td>-0.0254</td> <td>1</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <th>n_2</th> <td>0.0060</td> <td>-0.0014</td> <td>0.0028</td> <td>-0.6703</td> <td>1</td> <td></td> </tr> <tr> <th>Conds_2</th> <td>-0.0444</td> <td>0.0073</td> <td>-0.0179</td> <td>0.5097</td> <td>-0.5904</td> <td>1</td> </tr> </tbody> </table>		Alpha_1	n_1	Conds_1	Alpha_2	n_2	Conds_2	Alpha_1	1						n_1	-0.2403	1					Conds_1	0.4667	-0.9697	1				Alpha_2	-0.0626	0.0106	-0.0254	1			n_2	0.0060	-0.0014	0.0028	-0.6703	1		Conds_2	-0.0444	0.0073	-0.0179	0.5097	-0.5904	1	<p>La matriz de correlación es una manera de ver la correlación que hay entre las variables ajustadas, es decir, la dependencia entre estas. En este caso es una matriz 6x6 porque se están optimizando tres variables para dos tipos de materiales. La diagonal indica la relación entre las mismas variables, es decir, su valor siempre será 1.</p> <p>Existe una buena correlación lineal entre n_1 y conds_1 y también entre n_2 y conds_2, siendo más notable entre n_1 y conds_1, esto indica que la solución encontrada no es única y es posible que la solución resultado corresponda a un valor local y no a un mínimo absoluto, esto se debe en gran parte a que se está optimizando tres parámetros en simultaneo, se recomienda que La conductividad hidráulica saturada Ks sea determinada experimentalmente puede ser con ayuda de un permeámetro de carga constante, esto asegura que la dependencia entre n y Ks no sea una consecuencia del modelo matemático sino más acertado al modelo físico.</p> <p>La baja correlación entre los parámetros n, ks y <math>\alpha</math>, de cada suelo indican que los suelos están bien diferenciados entre sí y que no hay dependencia entre ellos.</p>
	Alpha_1	n_1	Conds_1	Alpha_2	n_2	Conds_2																																												
Alpha_1	1																																																	
n_1	-0.2403	1																																																
Conds_1	0.4667	-0.9697	1																																															
Alpha_2	-0.0626	0.0106	-0.0254	1																																														
n_2	0.0060	-0.0014	0.0028	-0.6703	1																																													
Conds_2	-0.0444	0.0073	-0.0179	0.5097	-0.5904	1																																												

Resultado	Análisis																					
RSQUARE for regression of predicted vs observed =0.72171	Este es el error indicativo del ajuste entre las variables medidas y las calculadas conocido como RMSE ( <i>Root Mean Square Error</i> ). En este caso el coeficiente de correlación es bueno pero un poco bajo. Esto se debe principalmente a la incertidumbre en la medición de $\theta$ y el ajuste encontrado en el modelo inverso, también evidente en el caudal de salida.																					
<table border="1"> <thead> <tr> <th>Mat</th> <th>Qr [-]</th> <th>Qs [-]</th> <th>Alpha [1/cm]</th> <th>n [-]</th> <th>Ks [cm/sec]</th> <th>l [-]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.11</td> <td>0.42</td> <td>0.11282</td> <td>3.1174</td> <td>0.038803</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.06</td> <td>0.36</td> <td>0.28148</td> <td>3.3389</td> <td>0.039299</td> <td>0.5</td> </tr> </tbody> </table>	Mat	Qr [-]	Qs [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/sec]	l [-]	1	0.11	0.42	0.11282	3.1174	0.038803	0.5	2	0.06	0.36	0.28148	3.3389	0.039299	0.5	Parámetros resultados del modelo inverso.
Mat	Qr [-]	Qs [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/sec]	l [-]																
1	0.11	0.42	0.11282	3.1174	0.038803	0.5																
2	0.06	0.36	0.28148	3.3389	0.039299	0.5																

La solución que se muestra en la Tabla 42 es el resultado elegido luego de hacer un análisis del coeficiente del criterio de Akaike (AIC), el cual debe ser lo más bajo posible para respetar el principio de “verosimilitud” que indica el modelo con el menor número de parámetros posible y que mejor ajusta la varianza. Para realizar el análisis del AIC, se realizan cuatro modelos inversos en los cuales se optimizan 5,4,3 y 2 parámetros sucesivamente. El modelo más apropiado será el que tenga un valor más bajo de AIC. En la Tabla 43 se muestran los resultados de dicho análisis.

Tabla 43. Criterio de Akaike

Suelo de Plantación						AIC	RSQUARE
$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n	Ks	l		
0.11023	0.42496	0.12248	3.43140	0.03689	0.5	1320.0	0.71914
0.11722	0.42	0.11310	2.78200	0.03290	0.5	1445.0	0.65501
0.11	0.42	0.11282	3.11740	0.03880	0.5	1318.0	0.72171
0.11	0.42	0.11282	2.76680	0.03529	0.5	1437.0	0.66416

Arena						AIC	RSQUARE
$\theta_r$	$\theta_s$	$\alpha$	n	Ks	l		
0.06152	0.26885	0.29028	3.87780	0.06248	0.5	1320.0	0.71914
0.25482	0.36	0.28730	2.26260	0.00452	0.5	1445.0	0.65501
0.06	0.36	0.28148	3.33890	0.03930	0.5	1318.0	0.72171
0.06	0.36	0.28148	3.63370	0.14652	0.5	1437.0	0.66416

Valor Optimizado

## 8. DETERMINACIÓN DEL VOLUMEN ÓPTIMO DE ALMACENAMIENTO HYDRUS 1D

Con las características hidrodinámicas, resultado del análisis realizado en el capítulo 7, se realiza una modelación directa utilizando las mismas capas de suelo y sus propiedades. Para poder determinar el volumen óptimo de almacenamiento se tiene en cuenta que la estructura debe drenar en un periodo menor a 48 horas, para determinar este volumen es necesario establecer la condición de almacenamiento admisible sobre la estructura de 10 cm, lámina que es controlada por el vertedero de excesos.

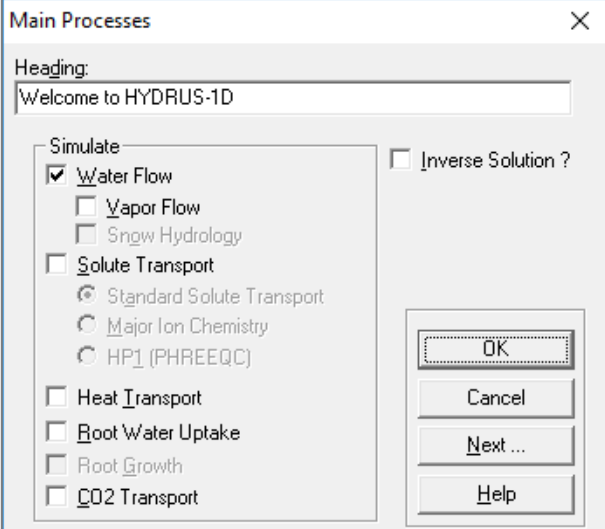
El funcionamiento de la estructura se puede resumir de la siguiente manera: En principio, y dependiendo de la magnitud del caudal de entrada, y de las condiciones iniciales de humedad de los suelos, el frente de humedad avanza hasta lograr la saturación de los materiales, en este punto puede haber acumulación de agua sobre la estructura, el valor máximo de este nivel está controlado por el vertedero de excesos, es decir, 0.10 m. Una vez la estructura se satura completamente y se tiene sobre esta la lámina permitida de almacenamiento, cada diferencial de caudal que ingresa a la estructura sale por escorrentía superficial del sistema, por lo tanto, la estructura completamente saturada y con una lámina superior de 10 cm corresponderá a la situación de almacenamiento máximo admisible. Este volumen de agua es el que se debe almacenar en la capa de gravas prevista para ello.

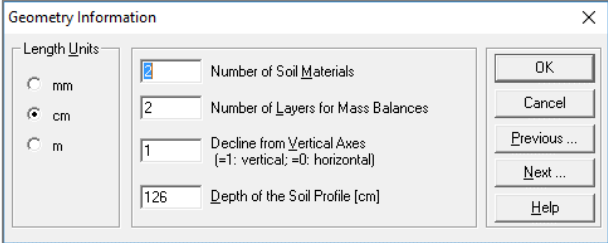
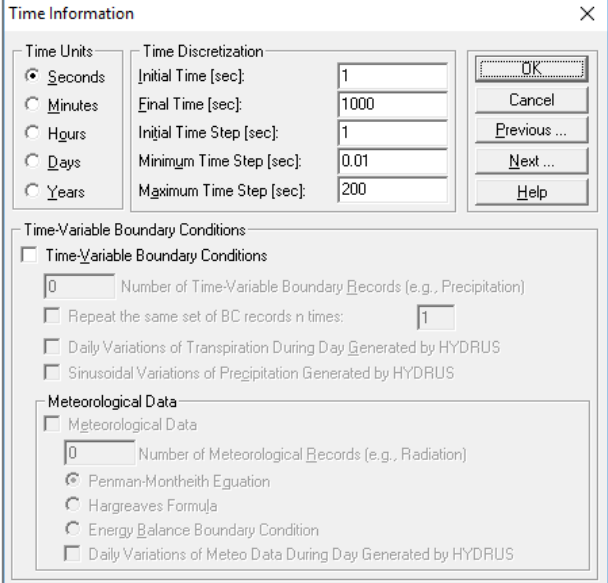
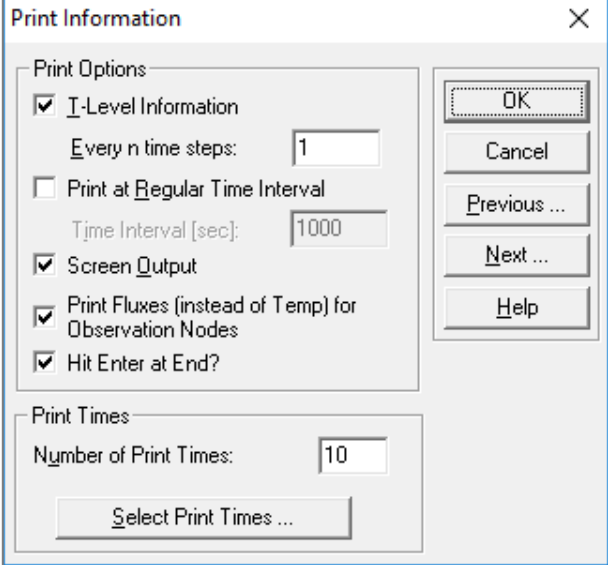
Se realiza una simulación directa teniendo en cuenta una condición de frontera superior de lámina constante y de frontera inferior del tipo drenaje libre. Una vez conocido el flujo de salida y con el tiempo admisible de retención, se puede establecer el volumen de almacenamiento adecuado. Se recomienda dimensionar la estructura con dos veces el volumen calculado, sin embargo, esto debe evaluarse de acuerdo a las condiciones propias del sitio donde se implementará el sistema de biorretención.

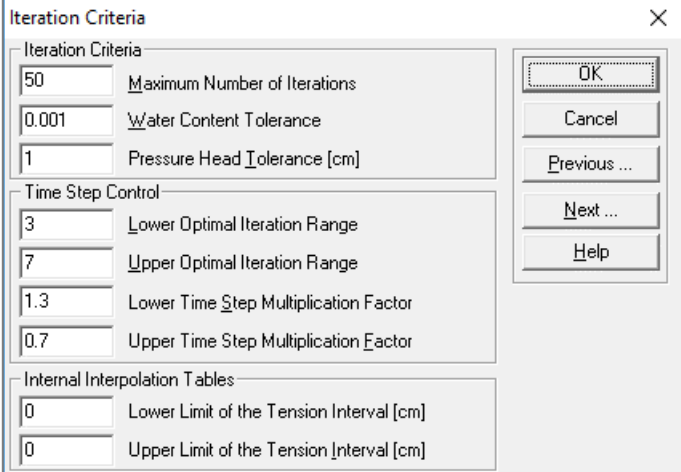
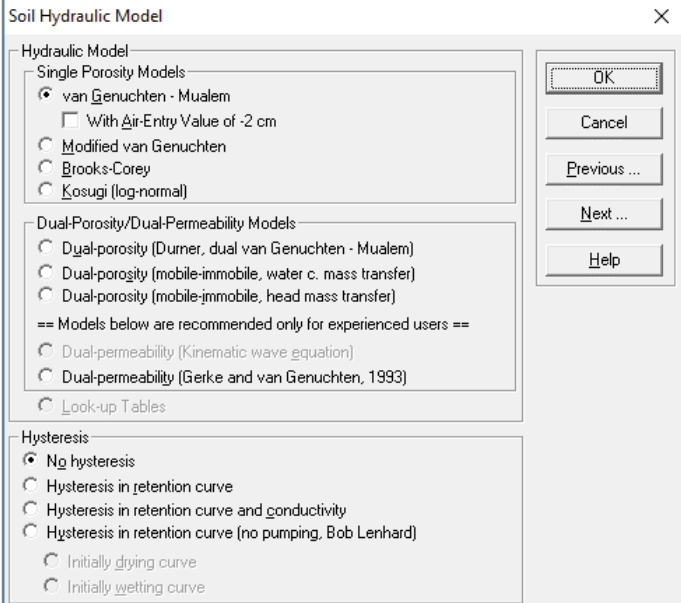
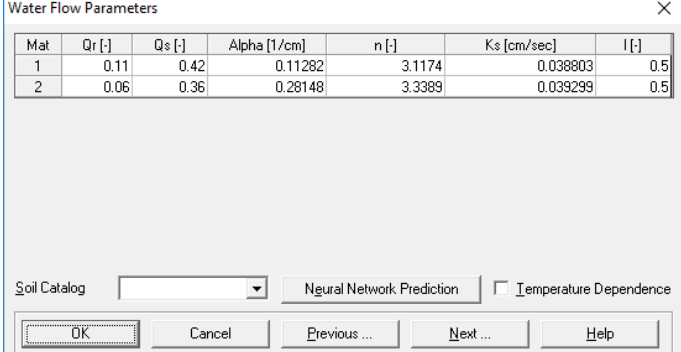
### 8.1. Definición del Modelo Directo para la Condición de Almacenamiento Admisible en la Estructura

Este modelo directo se construye teniendo en cuenta los criterios mencionados anteriormente, en la Tabla 44 se muestra el proceso de construcción del modelo en Hydrus 1D.

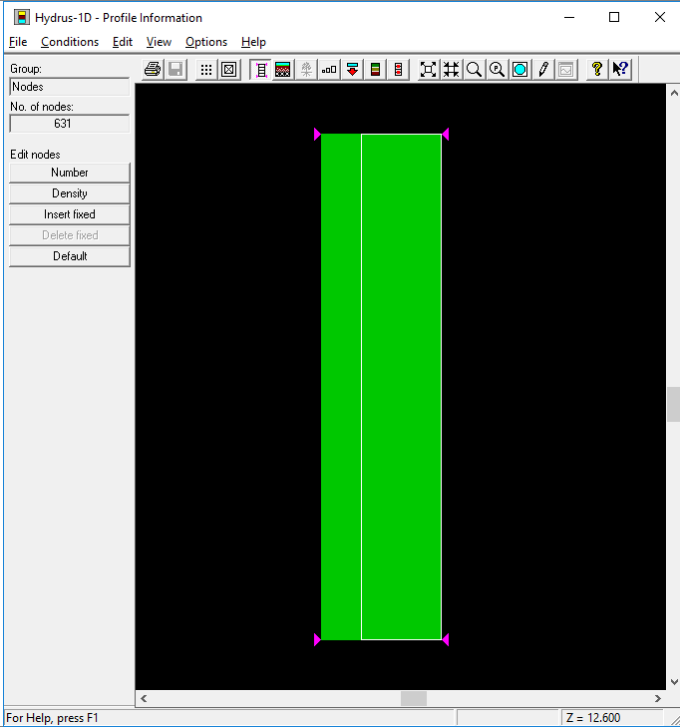
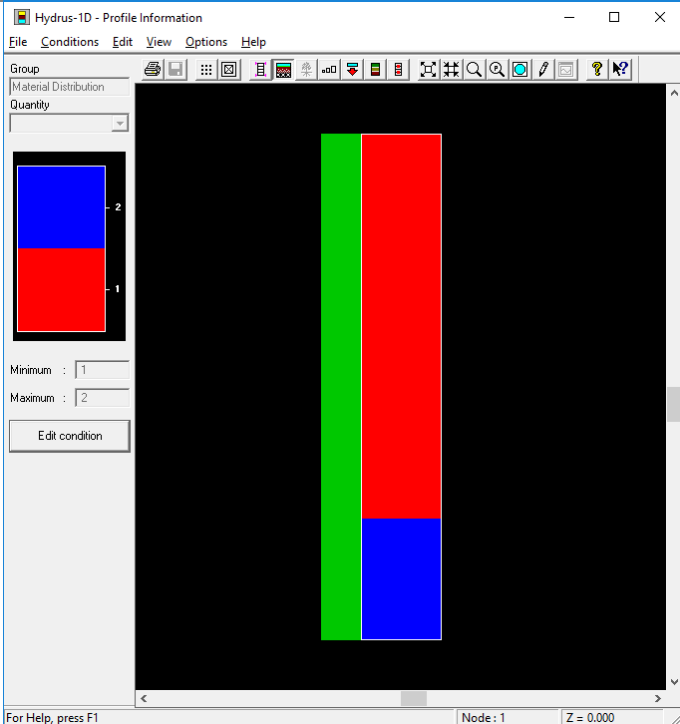
Tabla 44. Modelo Directo para Determinar el Flujo en la Estructura Condición de Carga de 0.10 m.c.a.

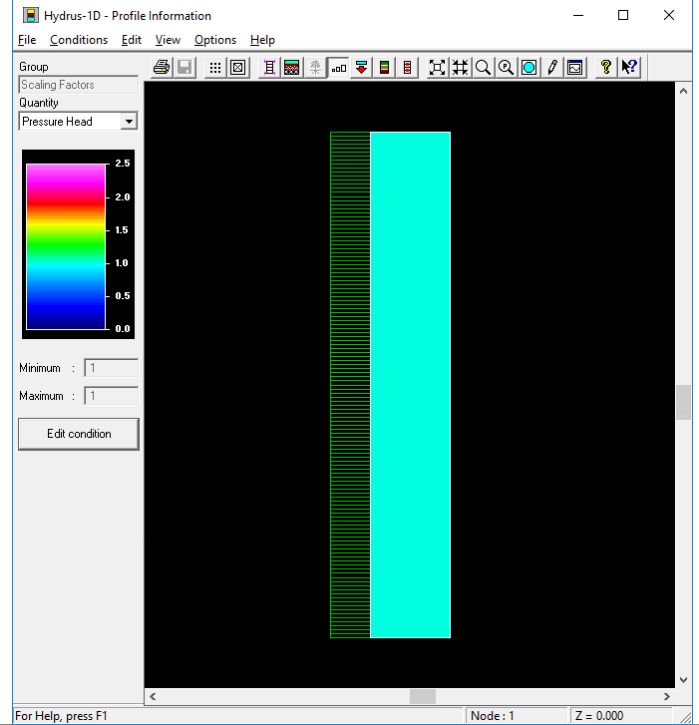
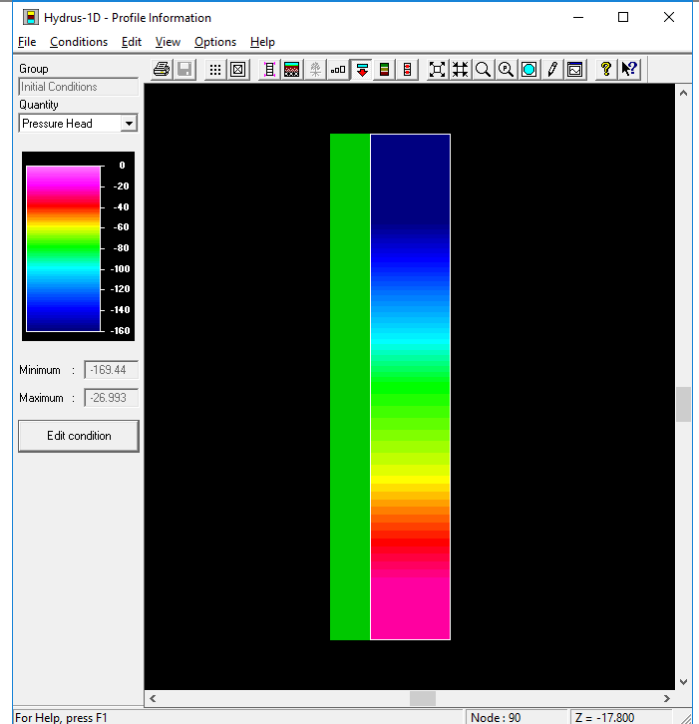
Ventana de Opciones	Criterios
	<p>Se quiere simular "Water Flow" en un modelo directo utilizando valores del flujo de salida para calcular el volumen apropiado de almacenamiento.</p>

Ventana de Opciones	Criterios
	<p>Se selecciona cm para todas las longitudes. Se consideran dos materiales y se suponen dos capas para el balance de masas, una para el suelo de plantación y otra para la cama de arena. 1 para flujo vertical, en la representación del gradiente hidráulico se incluye la gravedad. Lo que quiere decir que en la ecuación de Richards se considera o no el término de gravedad. El valor de la altura total de la columna de suelo se mide al inicio y al final del experimento, se opta por dejar el valor promedio de estas medidas.</p>
	<p>La información recopilada en el laboratorio se capturó cada segundo, se elige el este intervalo para tener congruencia en los tiempos, los parámetros de tiempos de iteración, mínimo y máximos, tiempo inicial y final se eligen dependiendo de la capacidad de cálculo.</p>
	<p>Se seleccionan 10 puntos para la visualización de la información teniendo en cuenta que en esta etapa son suficientes para visualizar el comportamiento del modelo directo.</p>

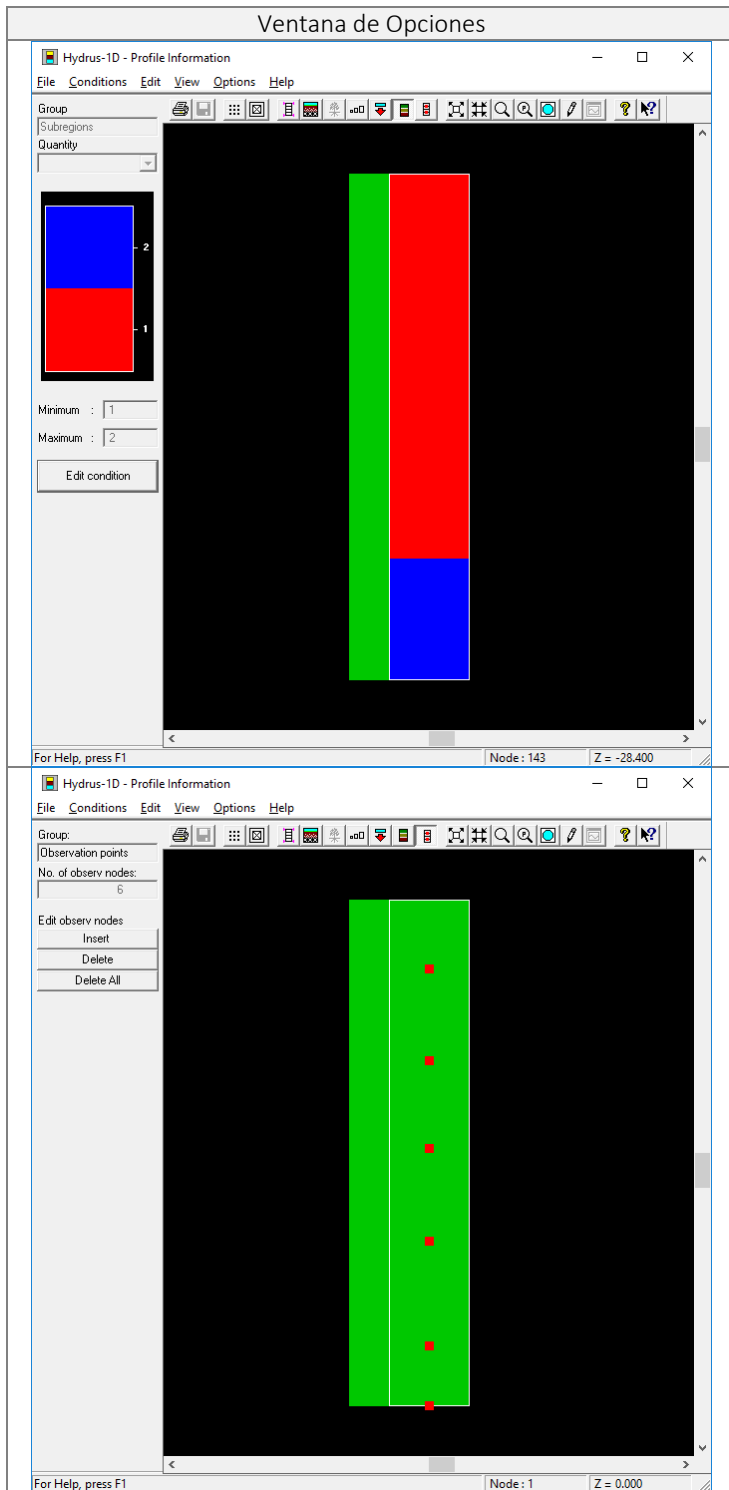
Ventana de Opciones	Criterios																					
	<p>El criterio de iteración, la tolerancia en la presión y en el contenido volumétrico de agua se ajustan con el objetivo de minimizar el error, no se consideran las tablas de interpolación.</p>																					
	<p>Se define utilizar el modelo de vG-M. sin considerar Histéresis.</p>																					
 <table border="1" data-bbox="224 1409 878 1472"> <thead> <tr> <th>Mat</th> <th>Qr [-]</th> <th>Qs [-]</th> <th>Alpha [1/cm]</th> <th>n [-]</th> <th>Ks [cm/sec]</th> <th>l [-]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.11</td> <td>0.42</td> <td>0.11282</td> <td>3.1174</td> <td>0.038803</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.06</td> <td>0.36</td> <td>0.28148</td> <td>3.3389</td> <td>0.039299</td> <td>0.5</td> </tr> </tbody> </table>	Mat	Qr [-]	Qs [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/sec]	l [-]	1	0.11	0.42	0.11282	3.1174	0.038803	0.5	2	0.06	0.36	0.28148	3.3389	0.039299	0.5	<p>Se introducen los valores encontrados a partir del modelo inverso.</p>
Mat	Qr [-]	Qs [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/sec]	l [-]																
1	0.11	0.42	0.11282	3.1174	0.038803	0.5																
2	0.06	0.36	0.28148	3.3389	0.039299	0.5																

Ventana de Opciones	Criterios																																																																																																																																
<div data-bbox="217 268 876 932"> <h3>Water Flow Boundary Conditions</h3> <p>Upper Boundary Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> Constant Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Constant Flux</li> <li><input type="radio"/> Atmospheric BC with Surface Layer</li> <li><input type="radio"/> Atmospheric BC with Surface Run Off</li> <li><input type="radio"/> Variable Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Variable Pressure Head/Flux</li> <li><input type="checkbox"/> Triggered Irrigation</li> </ul> <p>Lower Boundary Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Constant Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Constant Flux</li> <li><input type="radio"/> Variable Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Variable Flux</li> <li><input checked="" type="radio"/> Free Drainage</li> <li><input type="radio"/> Deep Drainage</li> <li><input type="radio"/> Seepage Face; h =</li> <li><input type="radio"/> Horizontal Drains</li> </ul> <p>Initial Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> In Pressure Heads</li> <li><input type="radio"/> In Water Contents</li> </ul> </div>	<p>La condición de frontera superior se establece con base en el máximo almacenamiento permitido sobre la estructura, este almacenamiento es de 10 cm, por lo tanto, es necesario mantener una presión constante de 0.10 m en la cota 0.0 de la columna. La condición de descarga libre es válida en este caso ya que la estructura drenará en una capa de gravas gruesas con un volumen de vacíos considerablemente más grande que el que componen las capas de suelo que componen la estructura.</p>																																																																																																																																
<div data-bbox="217 949 876 1400"> <h3>Soil Profile Summary</h3> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>z [cm]</th> <th>h [cm]</th> <th>Root [1/cm]</th> <th>Axz</th> <th>Bxz</th> <th>Dxz</th> <th>Mat</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td>0</td><td>10</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>0.2</td><td>-149.794</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>0.4</td><td>-149.587</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.6</td><td>-149.381</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>5</td><td>0.8</td><td>-149.175</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>6</td><td>1</td><td>-148.968</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>7</td><td>1.2</td><td>-148.762</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>8</td><td>1.4</td><td>-148.556</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>9</td><td>1.6</td><td>-148.349</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>10</td><td>1.8</td><td>-148.143</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>11</td><td>2</td><td>-147.936</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>12</td><td>2.2</td><td>-147.73</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>13</td><td>2.4</td><td>-147.524</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>14</td><td>2.6</td><td>-147.318</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>15</td><td>2.8</td><td>-147.111</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </tbody> </table> <p>Set to Default Values    Set Initial Conditions Equal to Field Capacity</p> </div>		z [cm]	h [cm]	Root [1/cm]	Axz	Bxz	Dxz	Mat	1	0	10	0	1	1	1	1	2	0.2	-149.794	0	1	1	1	1	3	0.4	-149.587	0	1	1	1	1	4	0.6	-149.381	0	1	1	1	1	5	0.8	-149.175	0	1	1	1	1	6	1	-148.968	0	1	1	1	1	7	1.2	-148.762	0	1	1	1	1	8	1.4	-148.556	0	1	1	1	1	9	1.6	-148.349	0	1	1	1	1	10	1.8	-148.143	0	1	1	1	1	11	2	-147.936	0	1	1	1	1	12	2.2	-147.73	0	1	1	1	1	13	2.4	-147.524	0	1	1	1	1	14	2.6	-147.318	0	1	1	1	1	15	2.8	-147.111	0	1	1	1	1	<p>Se define la condición de presión sobre la superficie de la capa de suelo de plantación en 10 cm. Los demás valores se toman con valores iniciales de presión obtenidos del muestreo realizado en el laboratorio.</p>
	z [cm]	h [cm]	Root [1/cm]	Axz	Bxz	Dxz	Mat																																																																																																																										
1	0	10	0	1	1	1	1																																																																																																																										
2	0.2	-149.794	0	1	1	1	1																																																																																																																										
3	0.4	-149.587	0	1	1	1	1																																																																																																																										
4	0.6	-149.381	0	1	1	1	1																																																																																																																										
5	0.8	-149.175	0	1	1	1	1																																																																																																																										
6	1	-148.968	0	1	1	1	1																																																																																																																										
7	1.2	-148.762	0	1	1	1	1																																																																																																																										
8	1.4	-148.556	0	1	1	1	1																																																																																																																										
9	1.6	-148.349	0	1	1	1	1																																																																																																																										
10	1.8	-148.143	0	1	1	1	1																																																																																																																										
11	2	-147.936	0	1	1	1	1																																																																																																																										
12	2.2	-147.73	0	1	1	1	1																																																																																																																										
13	2.4	-147.524	0	1	1	1	1																																																																																																																										
14	2.6	-147.318	0	1	1	1	1																																																																																																																										
15	2.8	-147.111	0	1	1	1	1																																																																																																																										

Ventana de Opciones	Criterios
	<p>Se definió una grilla cada 2 mm para mejorar la solución numérica.</p>
	<p>Se define la geometría de los materiales a utilizar, teniendo en cuenta la información de cotas para cada experimento.</p>

Ventana de Opciones	Criterios
	<p>El Factor de escala utilizado es de 1.</p>
	<p>La condición inicial de presión se define como la condición inicial que marca cada tensiómetro al inicio del experimento, esta condición se define interpolando las lecturas de los tensiómetros entre puntos de observación.</p>





**Criterios**

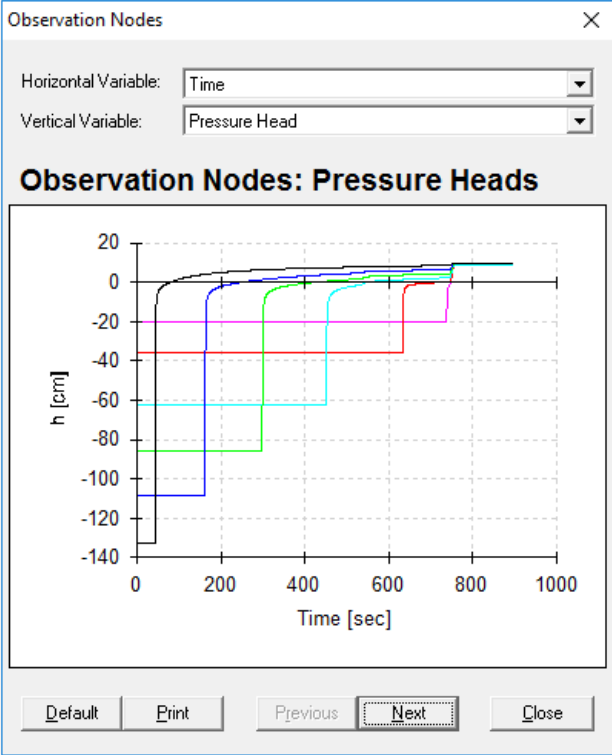
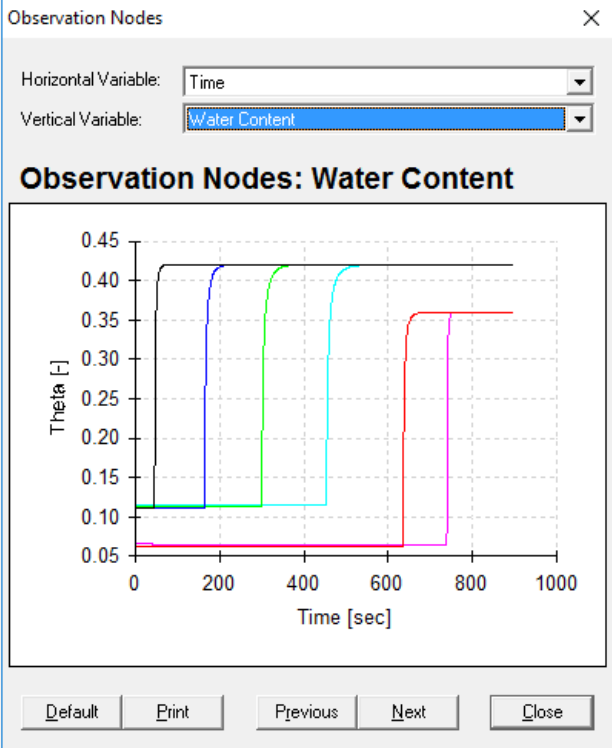
Las subregiones para el balance de masas deben coincidir con los límites de cada suelo, de lo contrario se presentará inestabilidad en la solución. Se definen dos sub-regiones en la frontera de cada suelo.

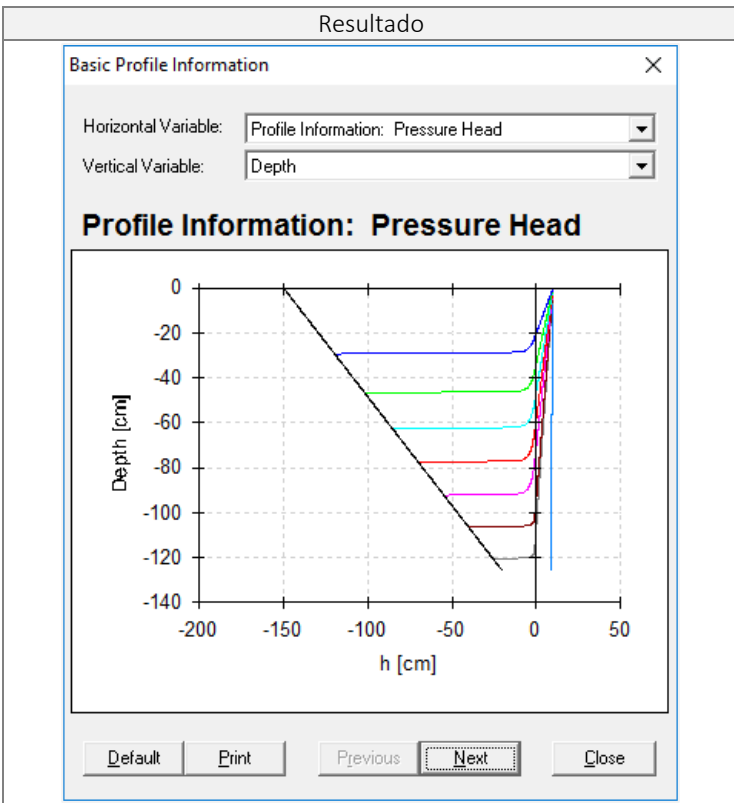
Se definen 6 puntos de observación de acuerdo a la posición de estos en el modelo de columna de suelo. Se incluye un punto en la frontera final para poder determinar el flujo de salida.

Puntos de Observación		
Cota Superior de suelo:	0.00	cm
Cota Inferior del Suelo:	126.00	cm
Cota Medidor ID 5	17.00	cm
Cota Medidor ID 4	40.00	cm
Cota Medidor ID 3	62.00	cm
Cota Medidor ID 2	85.00	cm
Cota Medidor ID 1	111.00	cm

8.1.1. Resultados y Análisis

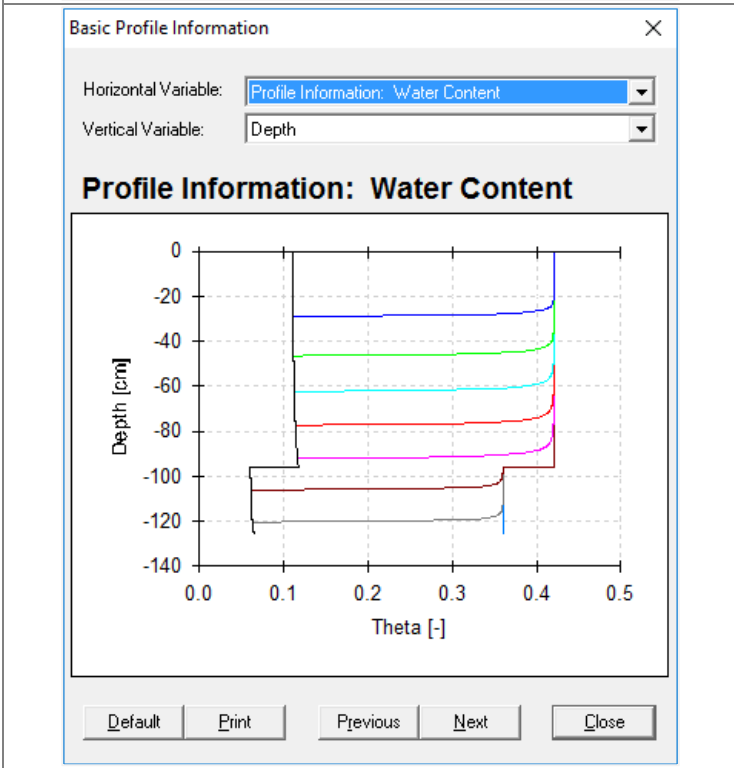
Tabla 45. Resultados y Análisis Cálculo del Volumen de Almacenamiento

Resultado	Análisis
	<p>El comportamiento de la presión obedece a la condición de contorno establecida, en principio la presión varía hasta llegar a la condición de carga de 10 cm.</p>
	<p>Se aprecia como el suelo alcanza la saturación en intervalos de tiempo muy similares para cada punto de observación.</p>

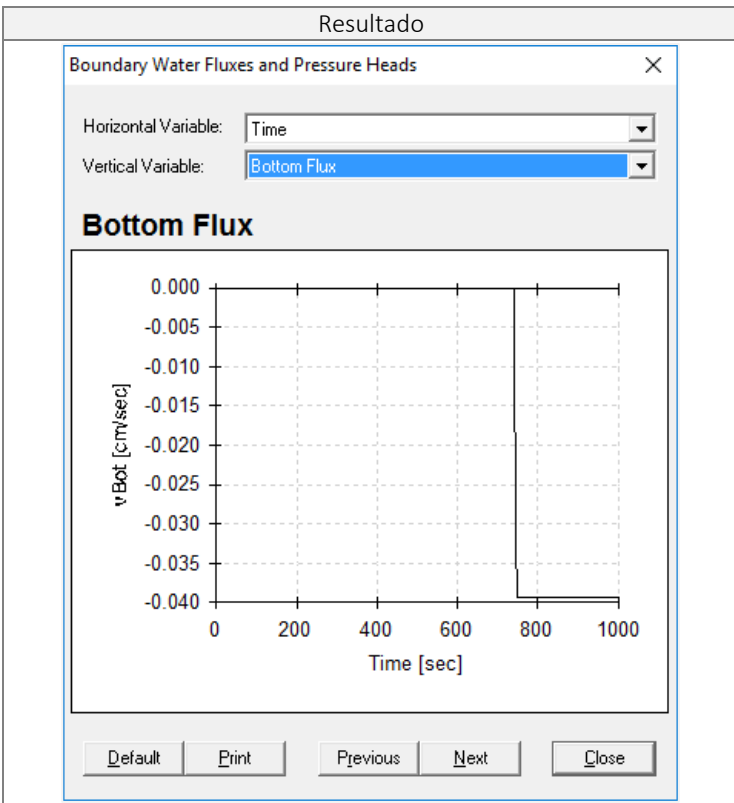


Análisis

Partiendo de la carga inicial el frente de humedad se mueve y satura el suelo hasta que sale de la estructura, la carga sobre la estructura acelera el proceso hasta la profundidad de -80 cm. Se aprecia también en la frontera de los dos materiales que el frente se distorsiona debido al cambio de suelo. Finalmente, la carga actúa sobre toda la columna hasta drenar libremente en el fondo.



El comportamiento del contenido volumétrico de agua en la frontera de los dos materiales no presenta distorsión por ascensión capilar, el suelo se satura y drena de acuerdo a lo esperado con el análisis de los tensiómetros.



Análisis

El flujo en la salida es la variable más importante ya que su valor indica la condición de flujo para una carga constante sobre la estructura de 0.10 m y permite conocer el tiempo aproximado de retención que cumple la estructura, es un indicador que permite tener una idea de la amortiguación del pico de escorrentía que provoca la estructura de biorretención.

Data Grid Editor

Edit Insert Delete

	C1	C2
R908	731.901	-2.2847e-008
R909	732.888	-2.2854e-008
R910	733.876	-2.2862e-008
R911	734.864	-2.287e-008
R912	735.851	-2.2914e-008
R913	736.839	-2.3902e-008
R914	737.826	-9.6375e-008
R915	738.814	-9.5929e-006
R916	739.801	-0.00022074
R917	740.789	-0.0016434
R918	741.776	-0.0070123
R919	742.862	-0.016206
R920	744.698	-0.0275
R921	748.45	-0.037073
R922	756.691	-0.039299
R923	775.027	-0.039299
R924	816.85	-0.039299
R925	900.1	-0.039299

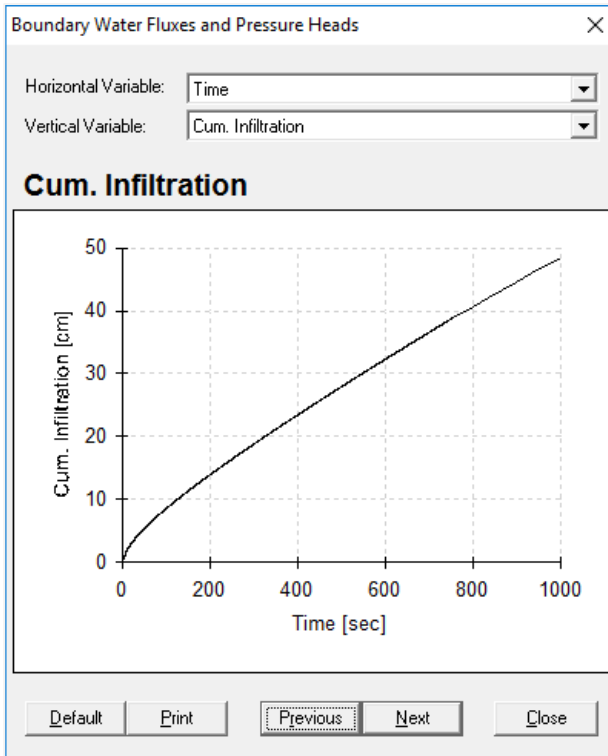
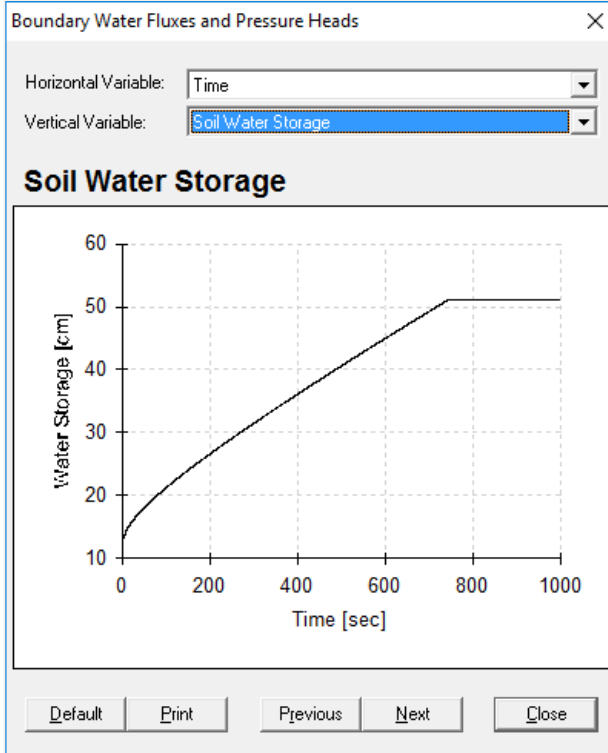
Grid Sizes:

Rows:  Row Labels:

Columns:  Column Labels:

En el comportamiento del caudal de salida se puede apreciar que la primera gota sale aproximadamente en el segundo 740, es decir que se tiene un tiempo de retención aproximado de 12.3 minutos. Este tiempo es el correspondiente a la condición más desfavorable en la que la estructura alcanza el máximo de almacenamiento permitido lo que indica que puede ser mayor.

El valor resultante de flujo de salida es de 0.04 cm/s. este valor será usado para determinar, de manera aproximada, el almacenamiento apropiado en la estructura propuesta.



La capacidad de almacenamiento, así como el tiempo de retención, depende directamente de las condiciones iniciales de humedad en la estructura. Todos los cálculos y flujos calculados varían en función de estado hídrico inicial en la estructura, los resultados que se presentan en este apartado están basados en las condiciones de equilibrio que se midieron sobre el piloto experimental.

La curva de almacenamiento de agua en el suelo es una función de la porosidad de los suelos, en principio el almacenamiento del suelo obedece al valor residente de humedad, esto se debe al llenado gradual de los poros con agua hasta ocupar el volumen de poros con un almacenamiento máximo de 51.114 cm.

La curva de infiltración acumulada permite conocer la intensidad con la que avanza el frente de infiltración con la condición de carga de 0.1 m, una vez se alcanza la velocidad de infiltración constante se aprecia que el flujo es gobernado por la condición de frontera inferior.

El volumen de almacenamiento se determina tomando como base el caudal de salida de la estructura de 0.04 cm/s, por lo tanto:

$$v = \frac{Q}{A} = \frac{V}{tA} \quad (29)$$

$$\frac{V}{A} = vt \quad (30)$$

Con la expresión (30) se puede estimar el volumen de almacenamiento por unidad de área en función de la velocidad del flujo de salida y el tiempo de retención, si se tiene en cuenta que el tiempo de retención es de aproximadamente 740 segundos con la ecuación (30) se calcula una altura estimada de 30 cm.

La capacidad de almacenamiento del suelo define la cantidad de agua que es posible retener en la estructura, de acuerdo a la Tabla 45 el almacenamiento en el suelo es de aproximadamente 50 cm, es decir, este sería el espesor adecuado para almacenar ese mismo volumen retenido.

El espesor de la capa de rocas se conforma con rocas media zonga, utilizada para la fabricación de concreto ciclópeo, con una ocupación en volumen del 40%, es decir, el 60% del volumen será ocupado por agua. Desde otro punto de vista, el 60 % de la altura corresponderá al espacio ocupado por el agua.

El espesor de la capa de almacenamiento recomendada se selecciona con base al espesor que cumple la condición en la que se almacena la capacidad de almacenamiento del suelo, es decir, 0.50 m. En este sentido, y teniendo en cuenta el volumen ocupado por las rocas, un espesor de 0.85 m cumpliría esta condición. Para una mayor flexibilidad se recomienda una capa de entre 0.8-1.0 m.

En los diferentes modelos que se realizaron en Hydrus 1D se observó que la capa de almacenamiento mejora altamente la eficiencia y el almacenamiento en la estructura, pasar de un medio filtrante de una capacidad de infiltración baja una alta mejora notablemente la velocidad de infiltración de la estructura.

## 9. EJEMPLO DE APLICACIÓN EN ZONA URBANA DE BOGOTÁ

En este capítulo se quiere encontrar las condiciones de funcionamiento de la estructura frente a un evento de lluvia típico de la ciudad de Bogotá con el fin de visualizar la mitigación del pico de escorrentía superficial comparando el hidrograma de entrada con el de salida de la estructura. La hidrología base para este estudio se conforma a partir de la sectorización de curvas IDF realizada por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. Se utiliza el método racional para la estimación de la escorrentía, el modelo de hietograma escogido para este análisis es el método de bloque alterno que es aceptado por el operador del servicio de alcantarillado de la ciudad de Bogotá.

### 9.1. Hidrología de la Zona

La zona hipotética de estudio se localiza en el predio de la Escuela Colombiana de Ingeniería de Bogotá. De acuerdo con la información del operador del servicio de alcantarillado la ecuación de las curvas IDF que gobierna esta zona se muestra en la Tabla 46.

Tabla 46. Curvas IDF para la Zona de Estudio

CURVAS IDF				
Tr (años)		10	T inicial (min) =	15
TR	C <sub>1</sub>	X <sub>0</sub>	C <sub>2</sub>	I (mm/h)
3.00	5829.3486	33.50	-1.11900	75.73
5.00	8349.8039	39.90	-1.14438	85.30
10.00	13567.3638	48.40	-1.18990	97.32
25.00	21554.0315	57.00	-1.22867	112.58
50.00	30611.7935	63.40	-1.26328	123.83

$$I = C_1 * (d + X_0)^{C_2}$$

Para la definición de los hietogramas de lluvia para el análisis del comportamiento de la estructura se usa el método del bloque alterno. Se utilizan un periodo de retorno de 5 y 10 años que son los establecidos por la normatividad vigente (EAAB, 2009) para el dimensionamiento de drenaje urbano.

Para la construcción del hietograma de entrada se calculan las intensidades de lluvia, con la información de IDF disponible, en intervalos de 15 minutos para una lluvia de una hora. A partir de estos valores se determina la profundidad de la precipitación para cada intervalo. La construcción del hietograma se realiza manteniendo los mayores incrementos en el centro del rango y a partir de dichos incrementos de precipitación organizados se determinó la intensidad de lluvia en mm/hora para cada intervalo de 15 minutos, posteriormente se graficó, el resultado es el siguiente:

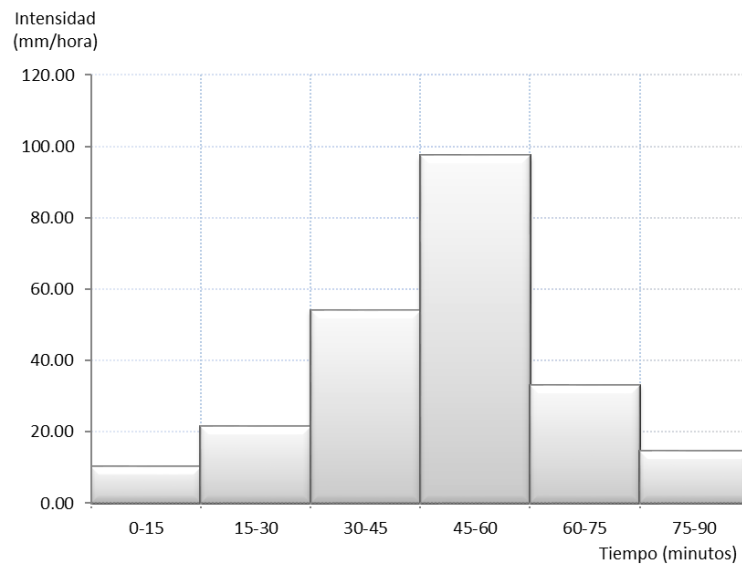
Tabla 47. Generación de Hietograma para Tr 10 Años

Duración (minutos)	Intensidad (mm/hora)	Profundidad Acumulada (mm)	Incremento de la profundidad (mm)
15	97.32	24.33	24.33
30	75.59	37.79	13.46
45	61.37	46.03	8.24
60	51.41	51.41	5.38
75	44.06	55.07	3.67
90	38.44	57.66	2.58

$$\Sigma = 57.66$$

HIETOGRAMA DE LA LLUVIA DE DISEÑO: "MÉTODO DEL BLOQUE ALTERNO"		
Tiempo (minutos)	Incremento (mm)	Intensidad (mm/hora)
0-15	2.58	10.33
15-30	5.38	21.50
30-45	13.46	53.86
45-60	24.33	97.32
60-75	8.24	32.95
75-90	3.67	14.67

Figura 98. Hietograma para la Zona de Estudio Tr 10 Años.

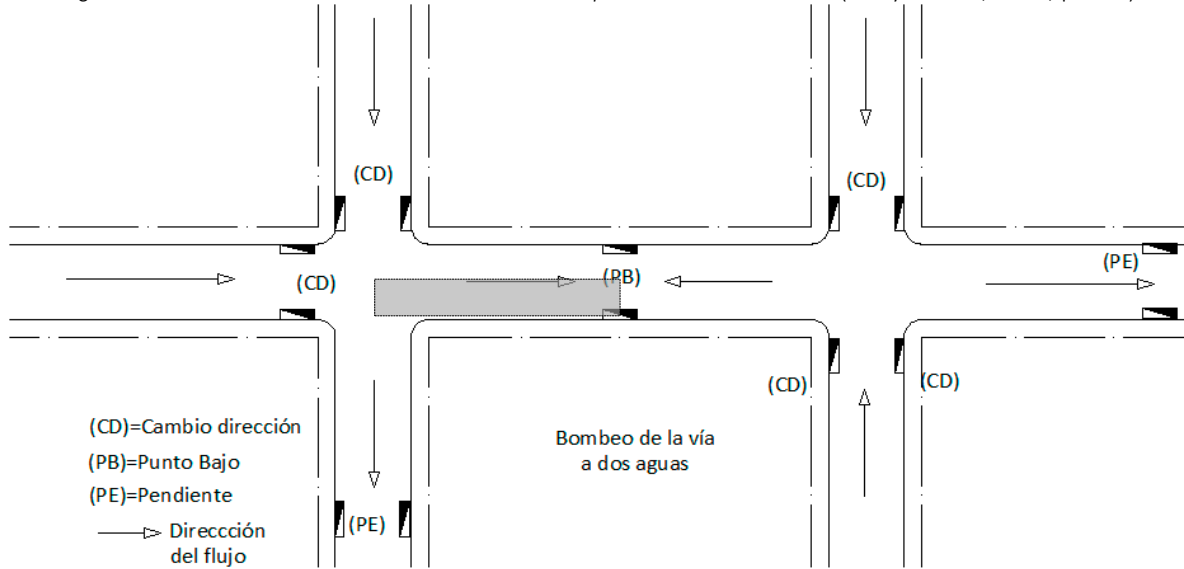


### 9.1.1. Área aferente

De acuerdo a la distribución urbanística de las ciudades y a los criterios de localización de sumideros recomendados por (Leidy Franco, 2015, p. 103) el área aferente a cada estructura de captación está definida por el ancho de la vía y la aproximación entre estructuras. Observando la Figura 99 el área aferente para cada estructura corresponderá a 1/4 del área total de la vía y que está limitada entre calles, si tenemos en cuenta el ancho típico de vía es de 7 m de ancho y la longitud entre manzanas es de aproximadamente de 60 m se puede pensar en un área aferente de 105 m<sup>2</sup> o 0.0105 ha.



Figura 99. Criterios Mínimos de Localización de Captaciones en una Calle (Leidy Franco, 2015, p. 104)



#### 9.1.2. Método racional

La estimación del caudal proyectado se realizó utilizando el Método Racional que resulta apropiado en áreas aferentes menores a 1.3 Hectáreas.

El Método Racional se expresa así:

$$Q = CIA \quad (31)$$

Donde:

Q: Descarga estimada en un sitio determinado, en litros por segundo.

C: Coeficiente de escorrentía, expresado por un número adimensional.

I: Intensidad de la lluvia, en litros por segundo por hectárea, para una duración igual al tiempo de concentración de la hoya y para el Período de retorno determinado.

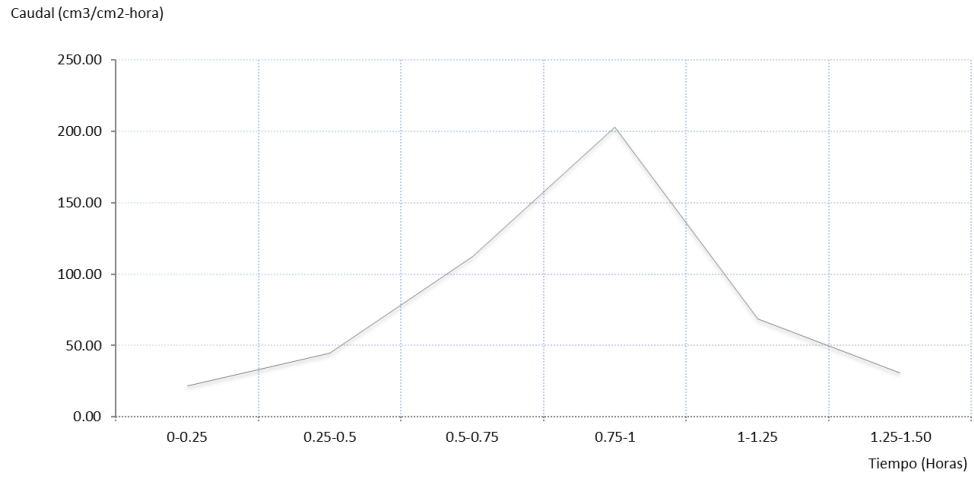
A: Área de drenaje en hectáreas.

El coeficiente de escorrentía está dado en función del tipo de suelo, de la impermeabilidad de la zona, de la pendiente del terreno y de otros factores que determinan la fracción de lluvia que se convierte en escorrentía, en este caso se selecciona un coeficiente de 0.80 recomendado para una vía de asfalto (EAAB, 2009).

Tabla 48. Hidrograma de Entrada

HIDROGRAMA DE ENTRADA: "MÉTODO DEL BLOQUE ALTERNO"					
Tiempo (minutos)	Intensidad (mm/hora)	Coeficiente de Escorrentía C	Área Aferente m <sup>2</sup>	Caudal (Lps)	Caudal (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> -h)
0-0.25	10.33	0.80	105.00	0.24	21.55
0.25-0.5	21.50	0.80	105.00	0.50	44.87
0.5-0.75	53.86	0.80	105.00	1.26	112.38
0.75-1	97.32	0.80	105.00	2.27	203.07
1-1.25	32.95	0.80	105.00	0.77	68.75
1.25-1.50	14.67	0.80	105.00	0.34	30.62

Figura 100. Hidrograma de Entrada



## 9.2. Modelo Directo Hydrus 1D

En primer lugar, el hidrograma aplicado (Figura 100) tiene en cuenta toda el agua que llega a la estructura por unidad de superficie, teniendo en cuenta el área aferente de drenaje y el área propia de la estructura.

La condición de frontera superior es un caudal variable de entrada, mientras que el borde inferior está gobernado con el supuesto de encontrar el nivel freático justo después de la capa de almacenamiento y retención, es decir, una presión constante igual a cero. Esto se realiza con el propósito de poder evaluar el escenario más desfavorable en términos de drenaje e infiltración. El volumen almacenado comenzará el proceso de infiltración sobre el suelo natural de cimentación de la estructura, si en ese punto se supone que estará el nivel freático este controlara el flujo en la estructura, es decir, no habrá infiltración en suelo natural ya que este estará completamente saturado. Esta condición comprende el escenario más desfavorable.

El modelo directo en Hydrus se resume en la *Tabla 49* y tiene como base las mismas consideraciones generales que se muestran en la *Tabla 44*. Se construyen dos modelos uno en el que se tiene en cuenta la capa de almacenamiento y otro en el que solamente se consideran los suelos de plantación y la cama de arena.

Tabla 49. Definición del Modelo Directo con Hidrograma de Entrada

Ventana de Opciones	Criterios
	<p>Se define utilizar el modelo de VG-M. sin considerar Histéresis</p>

Ventana de Opciones	Criterios																																										
<p><b>Water Flow Parameters</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Mat</th> <th>Qr [-]</th> <th>Qs [-]</th> <th>Alpha [1/cm]</th> <th>n [-]</th> <th>Ks [cm/hour]</th> <th>I [-]</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.11</td> <td>0.42</td> <td>0.11282</td> <td>3.1174</td> <td>139.691</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.06</td> <td>0.36</td> <td>0.28148</td> <td>3.3389</td> <td>141.476</td> <td>0.5</td> </tr> </tbody> </table> <p>Soil Catalog: <input type="text"/> Neural Network Prediction <input type="checkbox"/> Temperature Dependence <input type="checkbox"/></p> <p>OK Cancel Previous ... Next ... Help</p>	Mat	Qr [-]	Qs [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/hour]	I [-]	1	0.11	0.42	0.11282	3.1174	139.691	0.5	2	0.06	0.36	0.28148	3.3389	141.476	0.5	<p>Se introducen los valores encontrados a partir del modelo inverso.</p>																					
Mat	Qr [-]	Qs [-]	Alpha [1/cm]	n [-]	Ks [cm/hour]	I [-]																																					
1	0.11	0.42	0.11282	3.1174	139.691	0.5																																					
2	0.06	0.36	0.28148	3.3389	141.476	0.5																																					
<p><b>Water Flow Boundary Conditions</b></p> <p>Upper Boundary Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input type="radio"/> Constant Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Constant Flux</li> <li><input type="radio"/> Atmospheric BC with Surface Layer</li> <li><input type="radio"/> Atmospheric BC with Surface Run Off</li> <li><input type="radio"/> Variable Pressure Head</li> <li><input checked="" type="radio"/> Variable Pressure Head/Flux</li> <li><input type="checkbox"/> Triggered Irrigation</li> </ul> <p>Lower Boundary Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> Constant Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Constant Flux</li> <li><input type="radio"/> Variable Pressure Head</li> <li><input type="radio"/> Variable Flux</li> <li><input type="radio"/> Free Drainage</li> <li><input type="radio"/> Deep Drainage</li> <li><input type="radio"/> Seepage Face: h =</li> <li><input type="radio"/> Horizontal Drains</li> </ul> <p>Initial Condition</p> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="radio"/> In Pressure Heads</li> <li><input type="radio"/> In Water Contents</li> </ul> <p>OK Cancel Previous Next Help</p>	<p>La condición de frontera superior se establece con base en el hidrograma de entrada, es decir, una condición de flujo variable. La condición de frontera en el límite inferior se establece como una presión constante y se asigna el valor 0.0 para tener en cuenta la saturación en el límite inferior.</p>																																										
<p><b>Time Variable Boundary Conditions</b></p> <table border="1"> <thead> <tr> <th></th> <th>Time [hour]</th> <th>FluxTop [cm/hour]</th> <th>hCritA [cm]</th> <th>hTop [cm]</th> <th>KodTop</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>0.25</td> <td>-21.5526</td> <td>100000</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>0.5</td> <td>-44.8715</td> <td>100000</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>0.75</td> <td>-112.381</td> <td>100000</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>1</td> <td>-203.066</td> <td>100000</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>5</td> <td>1.25</td> <td>-68.7454</td> <td>100000</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>6</td> <td>1.5</td> <td>-30.6181</td> <td>100000</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table> <p>OK Cancel Previous ... Next ... Help ... Add Line Delete Line Default Time</p>		Time [hour]	FluxTop [cm/hour]	hCritA [cm]	hTop [cm]	KodTop	1	0.25	-21.5526	100000	0	0	2	0.5	-44.8715	100000	0	0	3	0.75	-112.381	100000	0	0	4	1	-203.066	100000	0	0	5	1.25	-68.7454	100000	0	0	6	1.5	-30.6181	100000	0	0	<p>Se ingresa la variación del caudal de entrada y el tiempo, es decir, el hidrograma de entrada que se muestra en la Figura 100.</p>
	Time [hour]	FluxTop [cm/hour]	hCritA [cm]	hTop [cm]	KodTop																																						
1	0.25	-21.5526	100000	0	0																																						
2	0.5	-44.8715	100000	0	0																																						
3	0.75	-112.381	100000	0	0																																						
4	1	-203.066	100000	0	0																																						
5	1.25	-68.7454	100000	0	0																																						
6	1.5	-30.6181	100000	0	0																																						

Ventana de Opciones								Criterios	
Soil Profile Summary									
	z [cm]	h [cm]	Root [1/cm]	Axz	Bxz	Dxz	Mat		
617	123.2	-22.8889	0	1	1	1	2		
618	123.4	-22.6825	0	1	1	1	2		
619	123.6	-22.4762	0	1	1	1	2		
620	123.8	-22.2698	0	1	1	1	2		
621	124	-22.0635	0	1	1	1	2		
622	124.2	-21.8571	0	1	1	1	2		
623	124.4	-21.6508	0	1	1	1	2		
624	124.6	-21.4445	0	1	1	1	2		
625	124.8	-21.2381	0	1	1	1	2		
626	125	-21.0317	0	1	1	1	2		
627	125.2	-20.8254	0	1	1	1	2		
628	125.4	-20.619	0	1	1	1	2		
629	125.6	-20.4127	0	1	1	1	2		
630	125.8	0	0	1	1	1	2		
631	126	0	0	1	1	1	2		

Se define la condición de presión en el límite inferior en 0 cm. Los demás valores se toman con valores iniciales de presión obtenidos del muestreo realizado en el laboratorio, que son los que se esperan en el momento de equilibrio de la estructura en campo.

9.2.1.1. Resultados sin tener en Cuenta la Capa de Almacenamiento

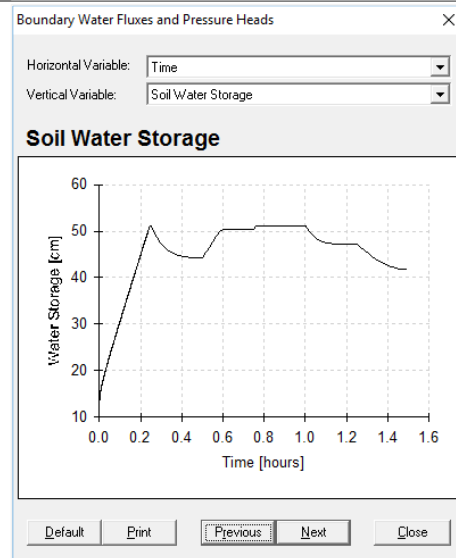
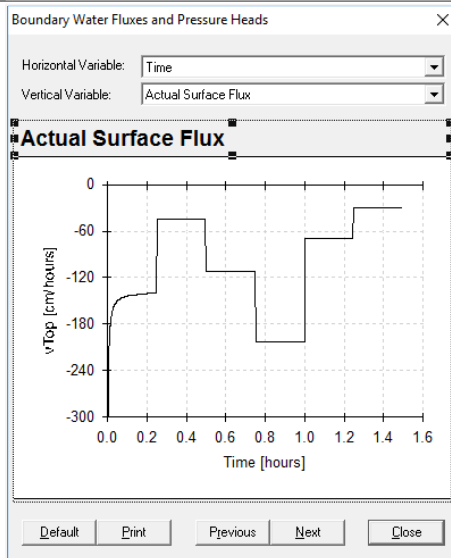
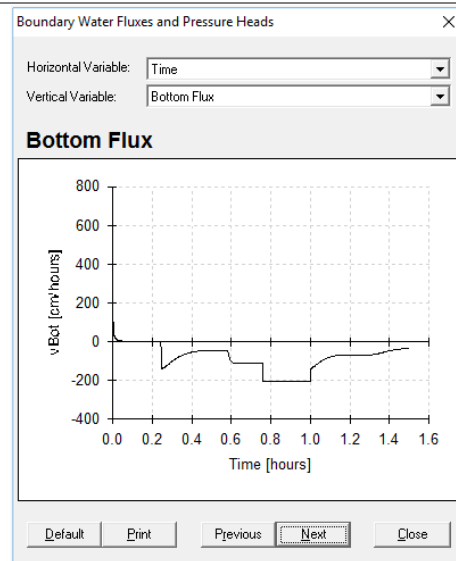
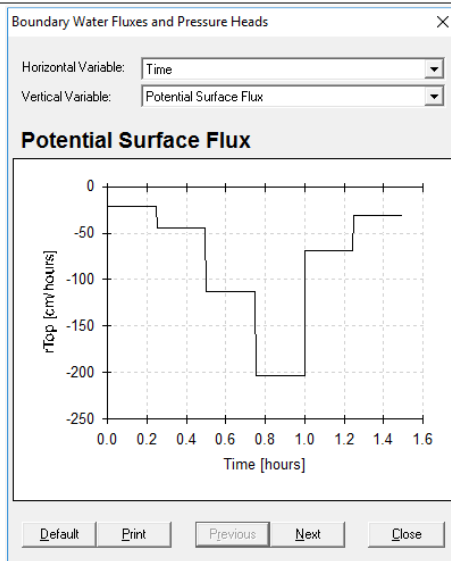
Tabla 50. Resultados Modelo Directo Con Hidrograma de Entrada sin Capa de Almacenamiento

Resultados y Análisis	
<p>Observation Nodes</p> <p>Horizontal Variable: Time</p> <p>Vertical Variable: Pressure Head</p> <p><b>Observation Nodes: Pressure Heads</b></p> <p>Default Print Previous Next Close</p>	<p>Boundary Water Fluxes and Pressure Heads</p> <p>Horizontal Variable: Time</p> <p>Vertical Variable: Cum. Surface Run-Off</p> <p><b>Cum. Surface Run-Off</b></p> <p>Default Print Previous Next Close</p>

## Resultados y Análisis

El comportamiento de la presión muestra como el flujo de entrada avanza a través del suelo, en los primeros 3/4 de hora no hay acumulación de agua sobre la superficie, es decir, el suelo infiltra todo el flujo de entrada en la estructura, a partir del tiempo  $T=0.75$  h se ve una acumulación de agua hasta llegar aproximadamente a los 56.612 cm de lámina de agua. Es evidente que esto ocurre en el pico del hidrograma y que es posible que se inicie un proceso de escorrentía superficial. Como la estructura cuenta con un vertedero de excesos, en la práctica esta presión superficial llegará hasta 10 cm, es decir, una vez se alcance esta presión comenzará a operar el vertedero y la condición de frontera para el cálculo cambiará ya que se presenta vertimiento a través del vertedero y al mismo tiempo continua el proceso de infiltración. Hydrus 1D no presenta una forma de analizar el flujo con esta condición de borde, por lo tanto, sólo se analiza la estructura sin tener en cuenta el vertimiento de excesos gobernado por el vertedero.

Con el hidrograma de entrada se alcanza el almacenamiento máximo de la estructura lo que hace que se acumule agua en la superficie.



### Resultados y Análisis

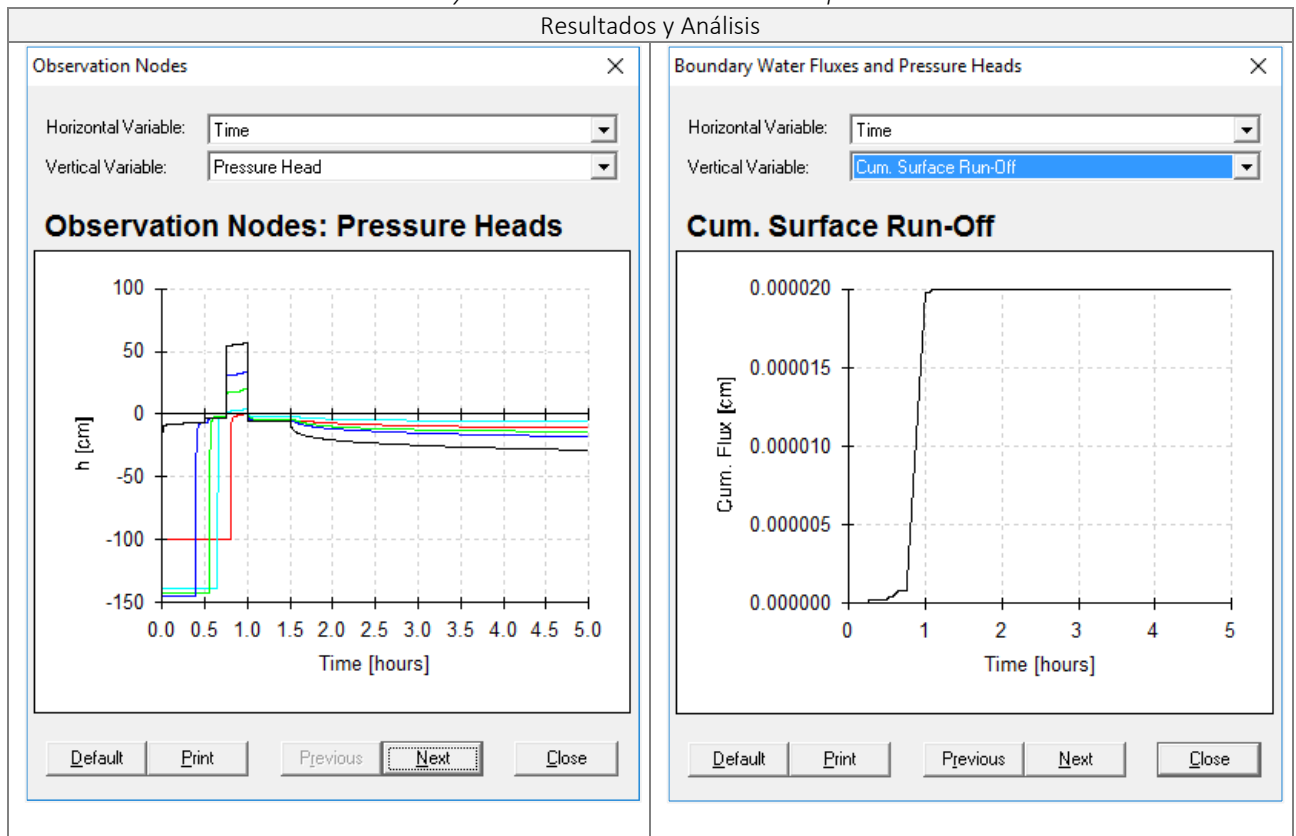
El hidrograma de entrada gobierna el flujo de entrada en la estructura, Hydrus realiza un primer cálculo del flujo que se muestra en actual Surface flux, este es el flujo interpretado en la superficie del suelo. Del mismo modo, se calcula el flujo en la frontera inferior en *Bottom Flux*, este flujo está condicionado por la condición de frontera inferior que se supone como presión constante igual a cero. La diferencia entre el flujo neto potencial y el flujo de salida daría la variación de flujo a causa del tránsito través de la estructura.

En principio La curva de almacenamiento del suelo está condicionada por los valores iniciales escogidos para el cálculo, es decir, no son representativos del flujo. Luego del minuto 27 se puede ver la variación en el almacenamiento debido a la condición del flujo de entrada, del mismo modo, como se observa en el gráfico de presión total, cerca al minuto 75 la estructura entra en carga superficial lo indica que ha llegado a su capacidad máxima de almacenamiento acumulando agua sobre la superficie, esto también se puede apreciar en la curva *Surface Run-off*.

#### 9.2.1.2. Resultados Teniendo en Cuenta la Capa de Almacenamiento

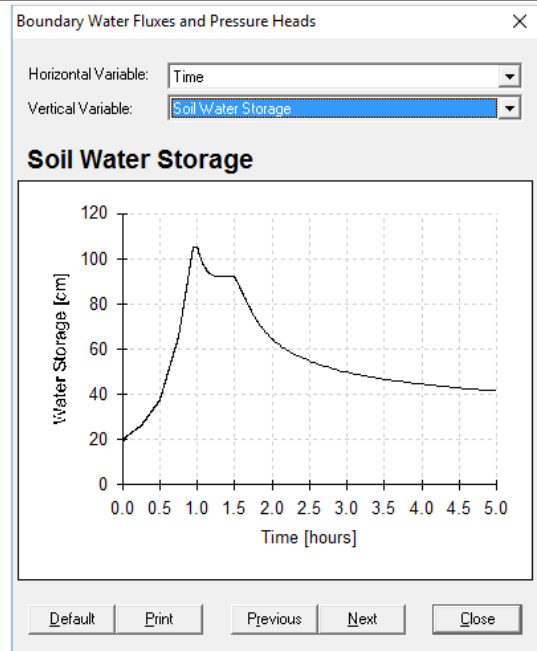
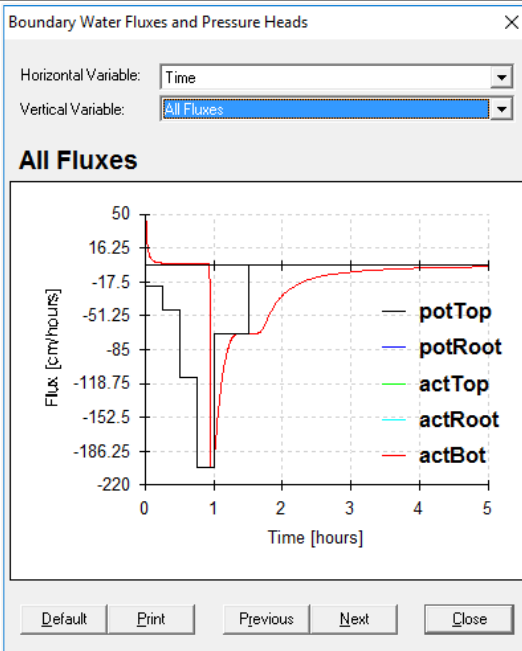
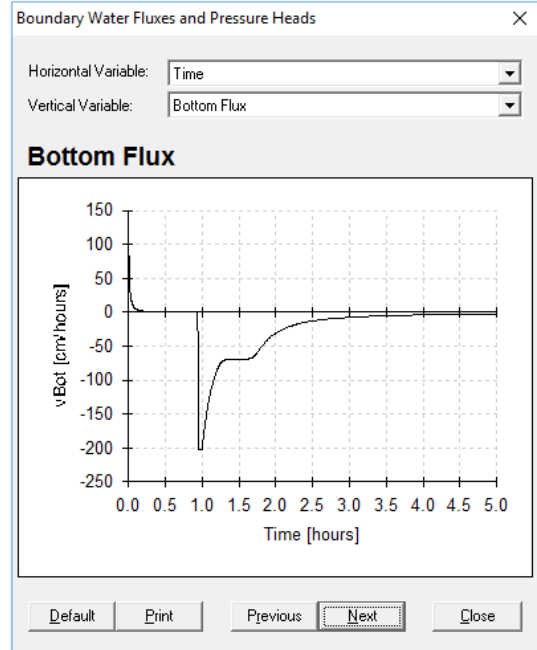
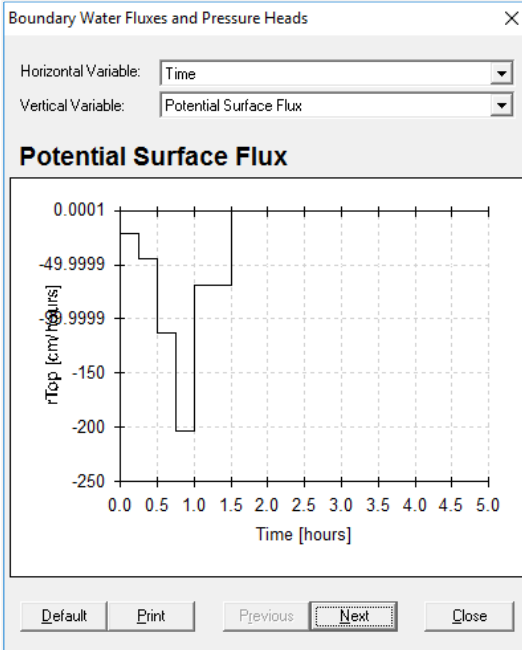
Para tener en cuenta la capa de almacenamiento se hace un nuevo modelo, que puede ser consultado en los anexos, donde se incluye una tercera capa de suelo y se le asigna unas propiedades iguales al de la arena según la clasificación USDA y el módulo Rosetta, teniendo en cuenta que para simular el gran volumen de agua que se almacena entre las rocas se supone un valor de  $K_s$  mucho más alto que el de la arena, del mismo modo, se supone  $\theta_s$  como 0.60, que es el espacio aproximado de volumen libre en la capa prevista para la retención. Para evitar problemas de visualización gráfica se seleccionan solamente puntos de observación en las fronteras de la estructura.

Tabla 51. Resultados y Análisis Teniendo en Cuenta la Capa de Almacenamiento



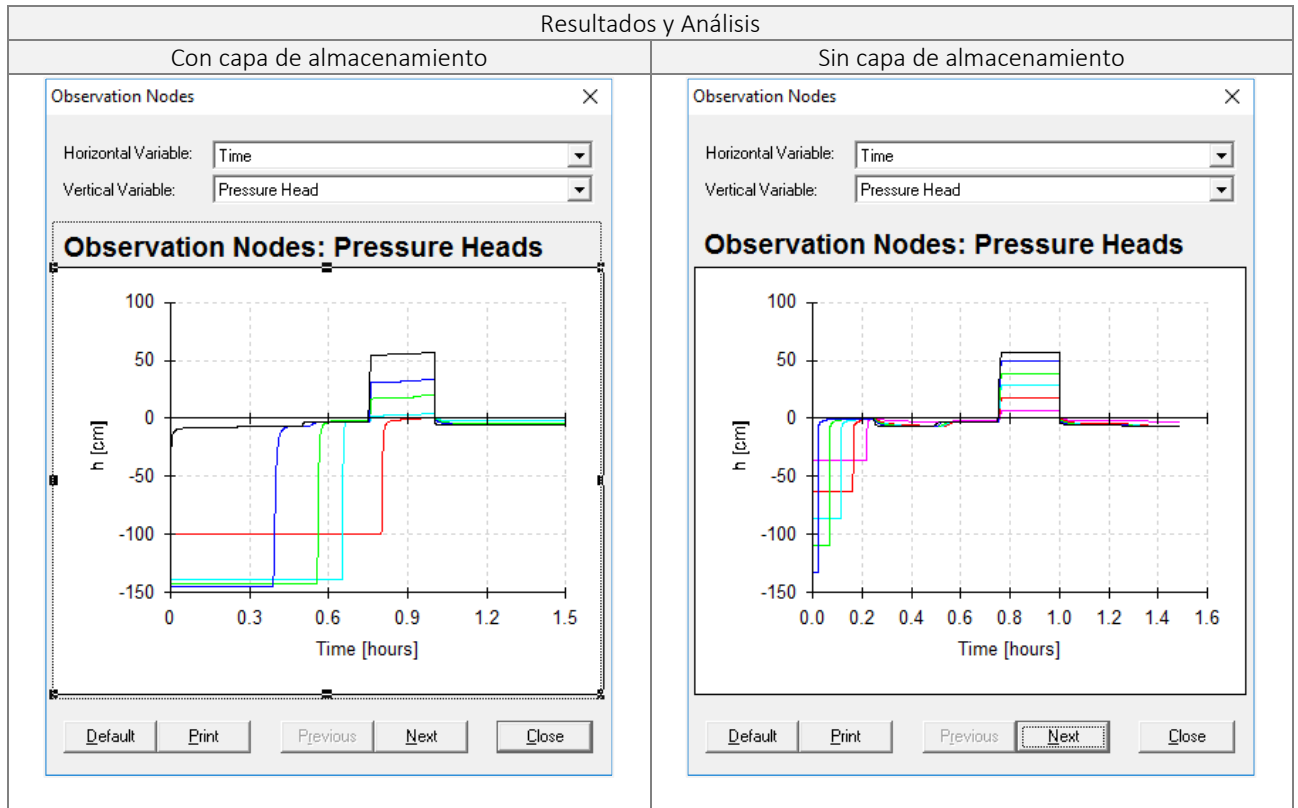
## Resultados y Análisis

El comportamiento de la presión muestra como el flujo de entrada avanza a través del suelo, en los primeros 3/4 de hora no hay acumulación de agua sobre la superficie, es decir, el suelo infiltra todo el flujo de entrada en la estructura, a partir del tiempo  $T=0.75$  h se ve una acumulación de agua hasta llegar aproximadamente a los 56.612 cm de lámina de agua, sin embargo, el proceso de infiltración continúa. Es evidente que esto ocurre en el pico del hidrograma, el flujo acumulado de escorrentía superficial muestra que no existe escorrentía sobre la estructura, es decir, toda el agua que ingresa fluye a través de los suelos hasta almacenarse en la capa de rocas.

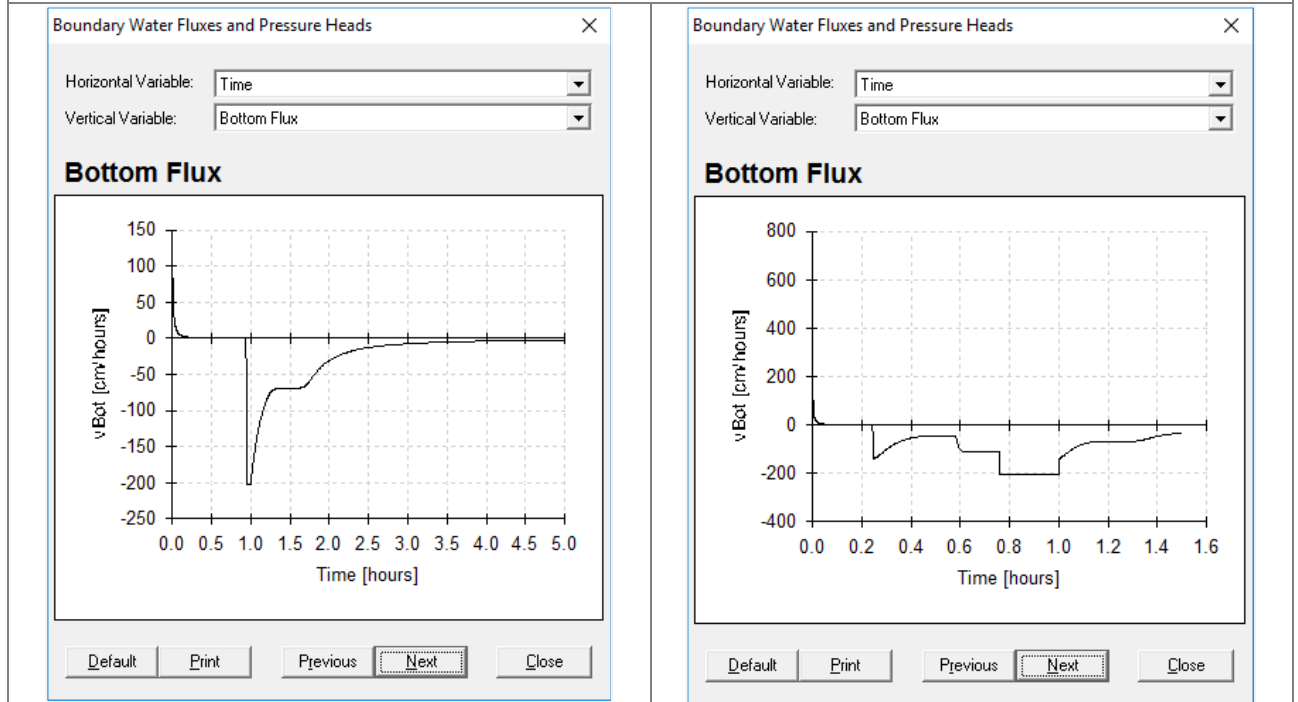


Partiendo de la curva de almacenamiento se puede observar que máximo valor de almacenamiento ocurre en el minuto 60, sin abarcar la totalidad del almacenamiento de la estructura, en efecto, en el gráfico *all fluxes* se puede ver que todo el flujo ingresó a la estructura.

9.2.1.3. Comparación de Resultados y Análisis



En ambos casos el comportamiento de la presión en la superficie sigue la misma tendencia, es evidente que debe ser similar puesto que en principio el frente de humedad debe recorrer la misma distancia, con el mismo gradiente y a través de los mismos suelos.



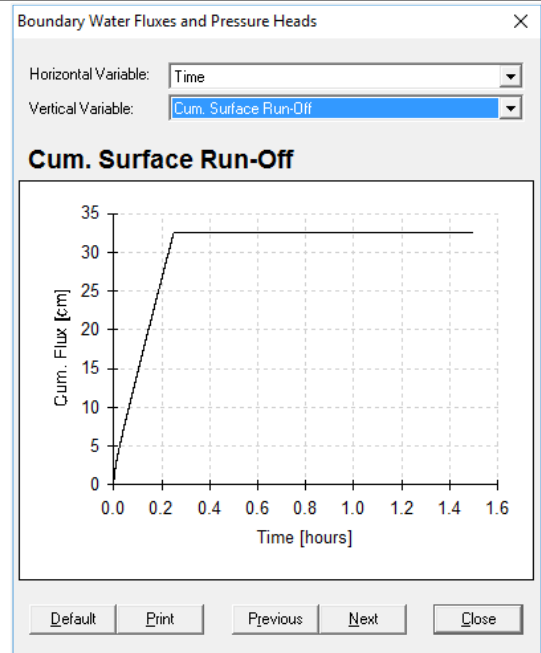
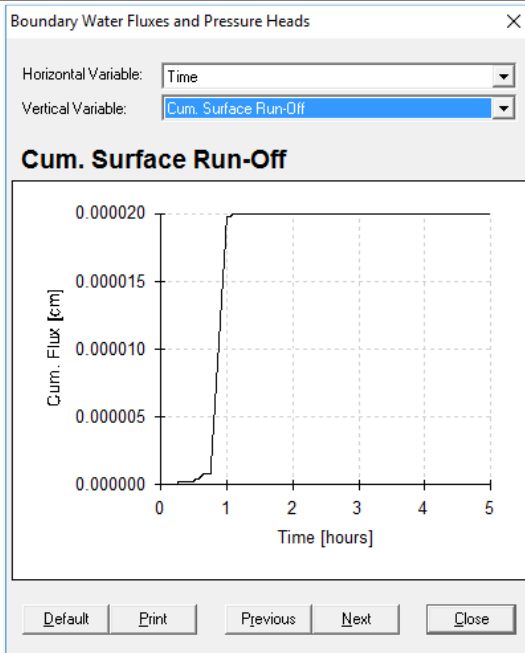


Resultados y Análisis

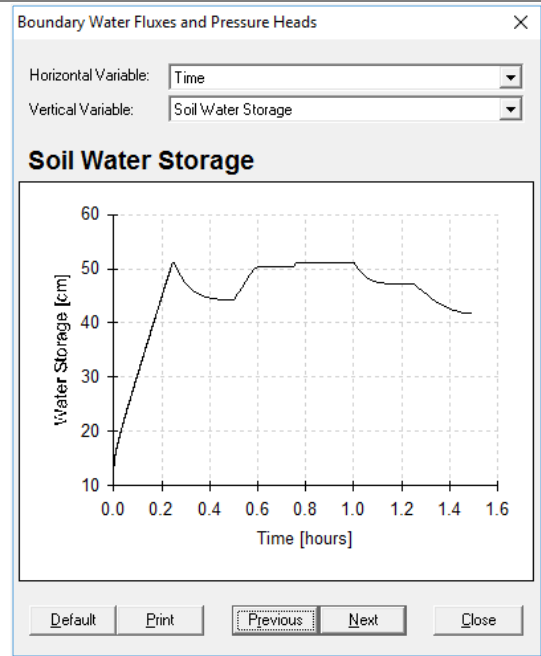
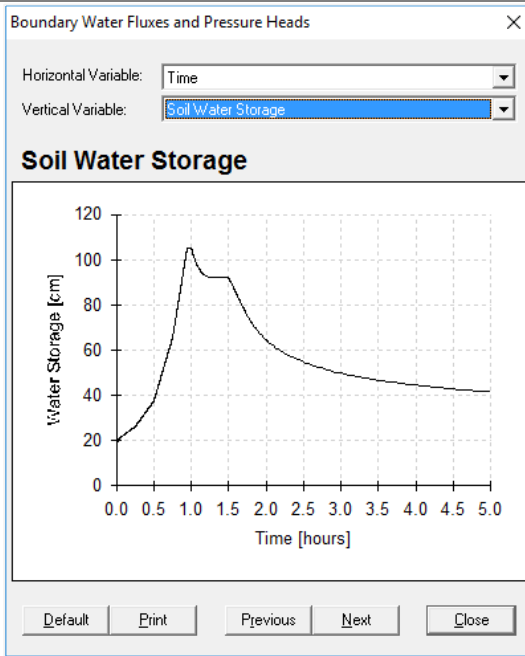
Con capa de almacenamiento

Sin capa de almacenamiento

El flujo en la frontera inferior es totalmente diferente en ambos casos, la estructura sin posibilidad de almacenamiento se ve limitada por la condición inferior de frontera y alcanza rápidamente la capacidad de almacenamiento lo que conyugará a que haya escorrentía superficial.



Como se esperaba, en el modelo que incluye zona de recarga no se produce escorrentía superficial mientras que en el otro se producen 33 cm de escorrentía acumulada en la superficie.



Resultados y Análisis	
Con capa de almacenamiento	Sin capa de almacenamiento
El almacenamiento en el suelo es evidentemente mejor en la estructura que tiene la capa de almacenamiento lo que indica que el volumen que se almacena mejora notablemente la capacidad de la estructura. Es importante tener en cuenta que la eficiencia de la estructura está limitada por las propiedades hidrodinámicas del suelo natural y las condiciones de humedad en la que la estructura se encuentre al momento de recibir la escorrentía aferente.	

#### 9.2.1.4. *Discusión Acerca de la Amortiguación del Hidrograma de Entrada*

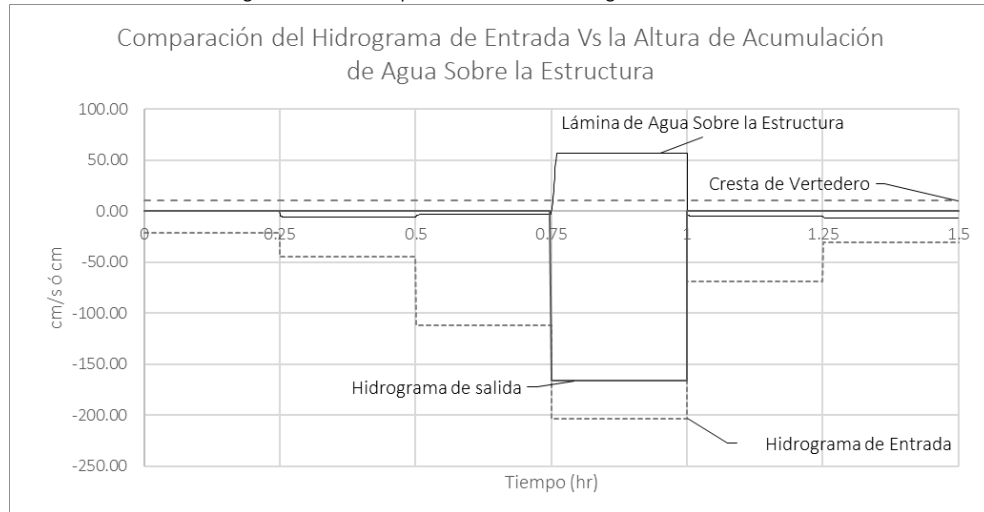
Dependiendo de la intensidad de la lluvia de la zona de estudio y del área aferente a la estructura, el hidrograma de entrada a la estructura puede ser controlado completamente por esta, sin embargo, la respuesta de la estructura de biorretención ante un evento de lluvia depende de las condiciones de humedad presentes en ella, es decir, si la estructura se encuentra totalmente saturada todo el caudal que entre en a ella será evacuado por el vertedero de excesos y no habrá amortiguamiento de dicho hidrograma de entrada.

Para poder hacer un análisis conservador, se parte de las condiciones de humedad de equilibrio registradas en el laboratorio durante varios periodos de drenaje de la estructura, este supuesto es acertado si se tiene en cuenta que es probable que luego de una lluvia intensa se dé el tiempo suficiente para la descarga de la estructura.

El vertedero de excesos es una variable que no fue posible considerar en el análisis realizado en el capítulo 9 y es de vital importancia considerarlo para un correcto análisis del hidrograma de salida que escurre a través de este. El punto de análisis del hidrograma de salida, y de acuerdo a los ejemplos planteados anteriormente, es la interpretación de la altura de presión sobre el límite superior de la estructura. En este caso se presentó una presión positiva de 56.6 cm, es decir, sobre el límite superior de la estructura se tiene una lámina de agua de 0.56 m con respecto a la cota superior del suelo de plantación. Como el vertedero está ubicado a una cota + 0.10 m de la superficie del suelo de plantación, justo en el instante en que el agua supera dicha cota el vertedero comienza su operación evacuando el exceso de agua.

En este punto, y con el modelo Hydrus, resulta incierto el flujo de salida del vertedero, pues con el modelo que ofrece Hydrus no puede definir claramente la condición de frontera para este caso, por lo tanto, no se puede evaluar con certeza cuál será el hidrograma de salida. la Figura 101 muestra una aproximación para el análisis de la escorrentía de salida de la estructura con base en el análisis realizado sin tener en cuenta el vertedero.

Figura 101. Interpretación del Hidrograma de Salida



El análisis que se muestra en la Figura 101 es aproximado y se basa en la interpretación del hidrograma de salida de la estructura con base en el almacenamiento de agua sobre esta, es decir, de los 0.56 m de agua acumulados sobre la estructura se descargan 0.46 m por el vertedero, este valor se traduce en términos de flujo por unidad de área para poder determinar una aproximación de lo que sería el caudal de salida, con lo que se encuentra que sí se reduce el pico de escorrentía, sin embargo, estos análisis dependen del estado hídrico inicial en la estructura, si la estructura se encuentra superficialmente saturada, seguramente, el hidrograma de entrada será muy parecido al de salida. El éxito de los sistemas de biorretención depende de las condiciones propias del suelo natural y de la capacidad de almacenamiento que estos sistemas disponen.

## CONCLUSIONES

### Sistema de Biorretención

- De acuerdo con la recopilación bibliográfica y los criterios adoptados en el capítulo 1.2, los componentes de la estructura de biorretención propuesta son:

- Control del flujo de entrada
- Pre-tratamiento
- Área de inundación superficial
- Capa orgánica superficial
- Material vegetal
- Capa para el sustento de la vegetación
- Lecho de arena
- Sistema de sub-drenaje compuesto por gravas o suelos permeables
- Sistema para el control del desbordamiento

- Las metodologías actuales de dimensionamiento y de diseño de sistemas de biorretención están basados en la experimentación y en estudio de casos particulares que a su vez se basan en las dimensiones propias de los sistemas de drenaje urbano tradicionales y la capacidad de almacenamiento que la estructura ofrece. El sistema que se propone en este estudio tiene en cuenta estas características desde el punto de vista del paisajismo propuesto por la cartilla de andenes de la ciudad de Bogotá. Los elementos que conforman la geometría del sistema se idealizaron con el propósito de mantener las recomendaciones de ancho de inundación de 1.5 m y sigue el esquema básico de un sumidero con caja en andén propuesto por el operador de servicio de acueducto y alcantarillado de la ciudad de Bogotá.

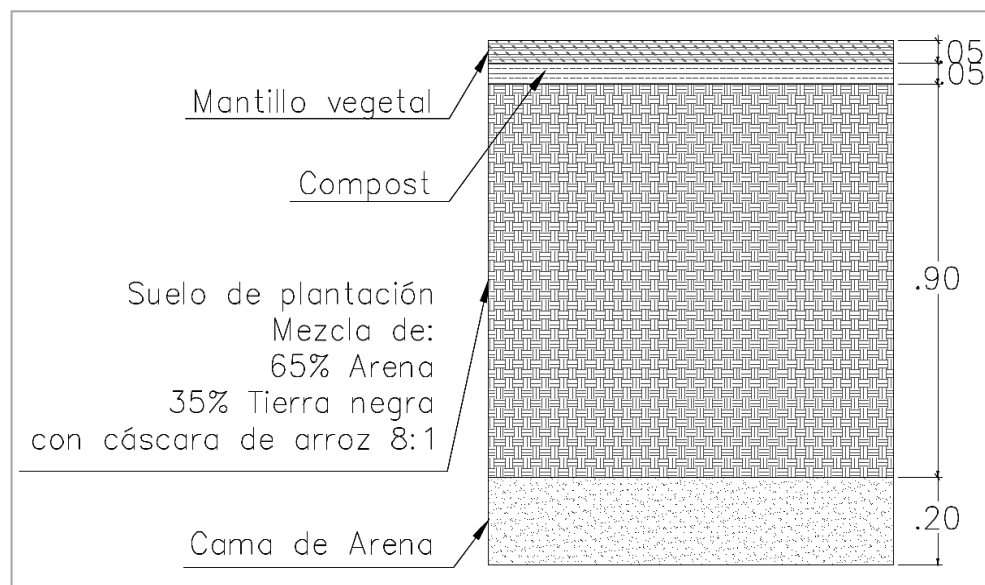
- La canaleta utilizada para recolectar la escorrentía superficial, elemento A120, tiene una capacidad máxima de 10.34 Lps, este caudal corresponde a un ancho máximo de inundación superficial recomendado de 1.5 m sobre una vía con pendiente transversal de 2%. Este elemento es prefabricado y tiene la finalidad de conducir el agua a la captación del sistema.

- Con el propósito de mejorar la eficiencia en la captación y el ingreso del agua dentro de la estructura se definió que el sistema de biorretención debe ser del tipo compuesto, rejilla y ventana. El elemento A128, de la cartilla de andenes, es adecuado para ser utilizado como rejilla en el sistema pues permite ser acoplado en varios módulos, sin embargo, la capacidad hidráulica de captación de este elemento debe someterse a un análisis experimental.

- El transporte de sedimentos y de basuras dentro del sistema de drenaje de aguas lluvias es una condición de diseño que se debe tener en cuenta con el propósito de facilitar las tareas de mantenimiento y de conservación del sistema de biorretención, dentro del dimensionamiento se encontró que un sedimentador con al menos un volumen de 0.79 m<sup>3</sup> (Tabla 12) es adecuado para captar sedimentos con un diámetro de al menos 0.20 mm. Diámetro medio típico de una arena que puede ser transportada por la escorrentía superficial en las vías urbanas pavimentadas.

- Se encontró una longitud de la captación lateral, para la condición de flujo uniforme y pendientes longitudinales entre 4.82 y 2.03 m y para una variación de pendientes entre el 2-20%, Teniendo en cuenta que la normatividad vigente recomienda un valor de 0.87 m, finalmente se adaptó una longitud de 1 m. El caudal que no sea captado por una unidad se transportará hacia aguas abajo hasta ser captado en su totalidad por alguno de los siguientes elementos que compone el sistema de drenaje.

- El vertedero de excesos propuesto es del tipo *morning glory* y operará con una cabeza máxima de 0.052 m para el caudal de diseño de 10.34 Lps (ver Tabla 11). La cresta del vertedero se debe localizar de tal manera que permita una lámina máxima de almacenamiento de 0.10 m, es decir, el espacio libre entre la cresta del vertedero de salida y el de entrada debe ser de al menos 0.152 m.
- De acuerdo a las recomendaciones dadas por la Cartilla de Andenes (Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá, 2007) el sardinel seleccionado para la conformación de la estructura sobre la vía es el elemento A10, elemento que puede ser modificado o complementado para poder construir la captación lateral del sistema.
- De acuerdo a las recomendaciones dadas por revisión literaria presentada en el capítulo 1.2, la capa de suelo de plantación está compuesta por una mezcla de arena 65 % en volumen y Tierra negra tamizada mezclada con cascarilla de arroz, 35 % en volumen. La arena utilizada debe corresponder a la especificación de arena utilizada en la mezcla de concretos ASTM C-33. Con un módulo de finura de 2.75 o mayor, el material debe estar comprendido entre los tamices 0.02" – 0.25" (tamices N°4 a N°40), la tierra negra debe cumplir con los lineamientos de calidad establecidos por el jardín botánico de Bogotá.
- De acuerdo a las recomendaciones generales recopiladas de los diferentes manuales de diseño y que se muestran en el capítulo 1.2, el diseño de los suelos resultante es el siguiente:



#### Caracterización de los Suelos

- De acuerdo a los ensayos de suelos realizados, y que se presentan en el capítulo 3, el suelo de plantación tiene una porosidad de  $0.42 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  y un diámetro medio de partículas de 0.387 mm. De acuerdo a la clasificación USDA el suelo de plantación clasifica como una arena, sin embargo, contiene limos y materia orgánica adecuada para el sustento de la vegetación.
- De acuerdo a los ensayos de suelos realizados, y que se presentan en el capítulo 3, la arena tiene una porosidad de  $0.6 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  y un diámetro medio de partículas de 0.556 mm. De acuerdo a la clasificación USDA clasifica como una arena.

## Piloto Experimental

- La rejilla que se instala en la base de la columna debe ser de un material plástico que no genere conductividad entre el suelo y la estructura. En todos los ensayos se observaron pequeñas fluctuaciones y ruido en la señal debido a que los sensores de medición contenido volumétrico de agua son resistivos y entran en conflicto con la resistividad del material de la rejilla de fondo cuando esta se encuentra cubierta de agua.
- Se observó que el material utilizado para la estructura contenedora del suelo (Tubo PVC Novafort) resulta muy adecuado, como se puede observar en la Figura 73, permite la fácil instalación de los instrumentos y tiene la suficiente rigidez para contener el suelo, por otra parte, el material es lo suficientemente rugoso para evitar el flujo laminar preferencial en las paredes.
- Los sensores MPX\_2102AP, utilizados para la construcción de los tensiómetros son adecuados y tienen la suficiente precisión para describir el comportamiento de la presión dentro de la columna de suelo. En todos los casos se encontraron coeficientes de correlación, entre datos medidos y calculados, superiores a 0.99 (Tabla 25) lo que indica que debidamente calibrados los tensiómetros tienen una confiabilidad alta, en la Gráfica 1 se puede apreciar que todos los tensiómetros tienen una respuesta lineal, cabe anotar que es importante usar los sensores de la serie MPX que cuenta con compensación por variaciones de la temperatura.
- Observando los resultados y los estadísticos (en todos los casos  $R^2 > 0.99$ ) de las correlaciones entre medidas realizadas con los tensiómetros contruidos en comparación con los datos de la presión tomada con un manómetro de alta precisión, se puede concluir que el tensiómetro ideado y construido en este trabajo es adecuado para el uso en calibración de suelos y medidas en campo y que, de acuerdo a los resultados de calibración presentados en la Tabla 25, obedece a un comportamiento lineal con una precisión de  $\pm 2$  cm y una sensibilidad de respuesta de 5 ms.
- De acuerdo a las pruebas realizadas y que se muestran en el capítulo 4.5 se puede concluir que los medidores resistivos ideados para la medición del contenido volumétrico de agua son adecuados y altamente confiables en valores pequeños de humedad, sin embargo, para mediciones cercanos al contenido volumétrico de agua de saturación los medidores no son confiables.
- De acuerdo a los resultados mostrados en el capítulo 4.5, se hallaron diferentes ecuaciones de calibración para cada medidor de contenido volumétrico de agua, encontrando dos comportamientos marcados, uno lineal para el suelo de plantación y uno polinómico para la arena, en conclusión, cada medidor debe calibrarse particularmente para cada tipo de suelo, esto se debe principalmente a la heterogeneidad del suelo y a la constante de conductividad propia de los minerales que lo conforman.
- De acuerdo a las diferentes observaciones y pruebas experimentales realizadas, el sensor de temperatura LM-45 requiere de un filtro análogo de ruido, para lograr una mejor sensibilidad en la medición de la temperatura, la Tabla 30 muestra una correlación lineal entre el valor del voltaje emitido por el sensor y la temperatura medida con un termómetro de mercurio ( $\pm 0.1$  °C) con una correlación de  $R^2 = 0.99$ , lo que indica que es muy estable en el rango de temperaturas usuales de los suelos naturales y los utilizados en el laboratorio.
- La captura de datos realizada en Labview resultó muy adecuada y brindó la posibilidad de ver el comportamiento de la totalidad de los sensores en tiempo real, sin embargo, durante las observaciones realizadas se detectó una inconsistencia en el tiempo de registro, el cual, al final del experimento, no se mantenía constante con respecto al tiempo medido con un cronometro. Es decir, si el intervalo de medición era de 1 seg, luego de transcurridos algunos miles de segundos se encontró que el intervalo de medición de 1 segundo no se mantenía constante, se demoraba más en mostrarse en pantalla. la máxima diferencia que se

encontró fue que mientras en el computador pasaba un segundo en el cronometro se registraban 3 segundos. Esta anomalía nace de la manera como el PLC Arduino y Labview se comunican entre sí, depende del viaje de paquetes de información y de la capacidad de cálculo de los procesadores del computador, para intervalos de mediciones menores a 10 segundos, se recomienda tomar el tiempo con un reloj lógico desde el PLC Arduino para incluirlo en la serie y capturarlo directamente desde el PLC Arduino.

#### Caracterización Hidrodinámica de los suelos

- El modelo inverso muestra un buen ajuste a los valores de tensión matricial, en la Tabla 42 se aprecia que el resultado de ajuste es adecuado para los primeros 4 puntos de observación, lo que indica que la lectura y tiempo de respuesta de los tensiómetros fue adecuada, el comportamiento de la tensión alcanza los valores cercanos al de saturación del suelo, sin embargo, la lectura ( $H=0 \pm 2$  cm) muestra que el suelo se saturó durante el experimento, esta pequeña discrepancia entre los valores medidos y ajustados se debe a una posible densificación del suelo, en efecto, la cota superior de la columna de suelo se redujo en 3 cm durante algunos ensayos.

-En el avance del frente de humedad registrado en la Figura 85 muestra que el tiempo de respuesta en cada tensiómetro es similar, por lo tanto, se puede concluir que el frente avanza a una tasa que tiende a ser constante.

-Durante los ensayos de prueba y definitivos no se observó flujo preferencial en las paredes del tubo que conforma la columna de suelo.

- Con el modelo inverso construido en Hydrus 1D, encontró una solución aceptable con una correlación RMSE (*Root Mean Square Error*) de 0.72. En este caso el coeficiente de correlación es bueno pero un poco bajo. Esto se debe principalmente a la incertidumbre en la medición de  $\theta$ , que como se discute en el capítulo 4.9, la confiabilidad de los higrómetros es baja para valores de  $\theta$  cercanos al de saturación de suelo.

– En el experimento, se observó que comenzó a salir agua de la columna antes de que la cama de arena alcanzara su equilibrio, lo que muestra la naturaleza transitoria del flujo de salida, se debe dar un peso importante, en la función objetivo, sobre todo a los puntos que indican que se alcanzó la condición permanente de flujo. Este es un factor muy importante en la calibración ya que funciona como control para el balanceo de la ecuación de ajuste.

- De acuerdo al modelo inverso presentado en el capítulo 7 las propiedades hidrodinámicas del suelo de plantación, para el modelo propuesto por vG-M. sin considerar Histéresis y con un RMSE de 0.72, son las siguientes:  $\theta_s = 0.42$ ;  $\theta_r = 0.11$ ;  $\alpha = 0.1128$ ;  $n = 3.1174$ ;  $k_s = 0.038803$ .

- De acuerdo al modelo inverso presentado en el capítulo 7 las propiedades hidrodinámicas del suelo arena utilizada para conformar la cama de arena, para el modelo propuesto por vG-M. sin considerar Histéresis y con un RMSE de 0.72, son las siguientes:  $\theta_s = 0.36$ ;  $\theta_r = 0.06$ ;  $\alpha = 2814$ ;  $n = 3.3389$ ;  $k_s = 0.039299$ .

- De acuerdo a las curvas granulométricas presentadas en el capítulo 3 los suelos utilizados tienen un alto contenido de arena, lo que resulta en un valor de  $n$  muy alto tal como se observó en los resultados de la calibración con Hydrus. Un alto contenido de arena en el suelo hace que el valor de  $n$  sea característico de un flujo muy poco difuso, muy cercano a un flujo tipo pistón, y esto se refleja claramente en las curvas  $h$  y  $\theta$  resultado de la simulación y que se presentan desde la Figura 93 hasta la Figura 97.

- De acuerdo a la matriz de correlación resultado del modelo inverso que se muestra en Tabla 42, existe una buena correlación lineal entre  $n_1$  y  $conds_1$  y también entre  $n_2$  y  $conds_2$ , siendo más notable entre  $n_1$  y  $conds_1$ . Esto indica que la solución encontrada no es única y es posible que la solución resultado corresponda a un valor local y no a un mínimo absoluto, esto se debe en gran parte a que se está optimizando tres parámetros en simultaneo lo que limita la convergencia de la función objetivo.

- De acuerdo a la matriz de correlación resultado del modelo inverso que se muestra en la Tabla 42, la baja correlación entre los parámetros  $n$ ,  $ks$  y  $\alpha$ , -0.0014, 0.0028, 0.0626, respectivamente, indican que los suelos utilizados en el diseño de la estructura están bien diferenciados entre sí y que no hay dependencia entre ellos.

#### Volumen de almacenamiento Recomendado

-De acuerdo a la Tabla 44 en el comportamiento del caudal de salida se puede apreciar que la primera gota sale aproximadamente en el segundo 740, es decir, se tiene un tiempo de retención aproximado de 12.3 minutos. Este tiempo es el correspondiente a la condición más desfavorable en la que la estructura alcanza el máximo de almacenamiento superficial permitido de 0.10 m.

-De acuerdo al modelo directo que se plantea en el capítulo 8 el flujo de salida para la condición de almacenamiento máximo de 10 cm, es de 0.04 cm/s.

- Según el modelo directo presentado en el capítulo 8 y los resultados de la Tabla 44 el volumen de almacenamiento recomendado para almacenar el agua retenida en los poros y macro poros del suelo, con una carga superficial de 10 cm es de 0.50 m<sup>3</sup>/m. Con las dimensiones propuestas en el numeral 1.2.4.6 se debe dejar una capa de rocas, de 0.8-1 m de profundidad y que cubra toda el área limitada por la estructura contenedora de raíces.

- El conjunto, modelación numérica, ensayos de suelos tradicionales y ensayos de columna de suelo resultaron muy adecuados en el diseño del sistema de biorretención. En la comparación que se realizó entre un sistema con y sin almacenamiento, se demostró que el sistema con almacenamiento mejora sustancialmente el comportamiento de la estructura de biorretención. Gracias al modelo desarrollado en Hydrus 1D, que se basa en los parámetros hidrodinámicos resultado del modelo inverso y propiamente en el ensayo de columna de suelo, se comprobó la importancia que tiene el almacenamiento de agua en los sistemas de biorretención, así como, su dimensionamiento partiendo de diferentes condiciones de frontera.

#### Aplicación en una zona urbana

- El modelo Hydrus no ofrece la posibilidad de analizar un hidrograma de entrada teniendo en cuenta una condición de frontera de almacenamiento máximo. Se utilizó una condición de frontera donde ese permite el almacenamiento sobre la estructura sin tener en cuenta el límite que controla el vertedero de excesos.

- Comparando el hidrograma de entrada y de salida, se encontró que debido al tránsito del hidrograma de entrada a través de la estructura y a un mayor tiempo de viaje se logró un amortiguamiento del pico de escorrentía, de acuerdo a la Figura 101, se puede observar que, dependiendo de las condiciones del hidrograma de entrada y de las condiciones de equilibrio del sistema es posible amortiguar crecientes locales.



## RECOMENDACIONES

- Los detalles constructivos que se presentan en el capítulo 1.2.4.7 son esquemáticos y se deben evaluar estructuralmente y adaptar de acuerdo a las condiciones propias del sitio.
- La mezcla de los suelos debe realizarse a partir de valores de humedad gravimétrica debajo del 5%. Preferiblemente ambos suelos deben tener valores de humedad similares con el fin de lograr una mezcla homogénea y que las diferencias de humedades no generen terrones de un único suelo, la mezcla de los suelos debe realizarse inicialmente manualmente y posteriormente mecánicamente.
- Los cables utilizados en diseño de la instrumentación deben ser de varios hilos y deben estar aislados y recubiertos, para el transporte de la señal se recomiendan usar pares de cables para cada línea, con el fin de anular las masas inducidas y eliminar el ruido.
- Se debe recubrir la caja donde se instala el PLC Arduino Mega preferiblemente con cinta de cobre para aislar todas las señales externas que pueden inducir ruido.
- Las masas de los sensores análogos deben separarse de las masas de los sensores digitales.
- Se deben utilizar fuentes estables, una para alimentar los sensores y otra para alimentar el PLC Arduino Mega, teniendo en cuenta que se deben unir las masas para poder registrar las lecturas.
- Es recomendable utilizar un reloj lógico directamente desde Arduino para poder sincronizar las señales con Lab View.
- Sea cual sea el sensor a utilizar siempre se debe calibrar y ajustar para las condiciones propias del montaje.
- El medidor de caudales de la serie YF-S siempre debe ser calibrado para mejorar la precisión en la medición, es preferible tener varias ecuaciones de calibración en función del tipo de flujo que se presente en la tubería.
- La estructura propuesta en este estudio se puede acomodar y modificar, siempre que se utilicen suelos con las mismas propiedades de granulometría y densidad los valores de calibración hidrodinámica pueden ser utilizados en los modelos directos que sean requeridos.

## INVESTIGACIÓN FUTURA

- Modelo físico a escala 1:1 de la estructura de biorretención propuesta para la evaluación del tiempo de retención y porcentaje mitigación de pico de escorrentía superficial.
- Calibración hidrodinámica de la estructura propuesta en dos dimensiones, aplicación de Hydrus 2D.
- Guía metodológica para la selección de plantas nativas y su uso en sistemas de biorretención en la ciudad de Bogotá, con base a las recomendaciones dadas por el jardín botánico de la ciudad de Bogotá.
- Experimento de columna de suelo con transporte de solutos típicos de la escorrentía superficial de las vías urbanas de la ciudad de Bogotá.
- Determinación del consumo de agua de plantas y raíces utilizadas en los sistemas de biorretención estandarizados.
- Fitorremediación, aplicada al sistema de biorretención estándar propuesto, utilizando plantas vasculares nativas de la sabana de Bogotá para la remoción de metales pesados propios de las vías urbanas, especialmente aceite de motor.
- Influencia de los sistemas de biorretención en la recarga de acuíferos de una zona de estudio de la ciudad de Bogotá.
- Cultivo de familia de mosquitos para determinar el tiempo de gestación y proliferación de estas especies, con el objeto de aumentar el tiempo de retención recomendado en estructuras de biorretención para la ciudad de Bogotá.
- Guía metodológica para el mantenimiento de estructuras de biorretención aplicadas a la ciudad de Bogotá.
- Guía Metodológica para el dimensionamiento de sistemas de biorretención aplicado a la ciudad de Bogotá.
- Guía Metodológica para la integración de los sistemas de biorretención estandarizados con los humedales naturales de la ciudad de Bogotá.
- Modelación Numérica 3D del comportamiento hidráulico de la estructura propuesta con todos sus componentes.

## REFERENCIAS

- AGRA, S. G. (2001). *Estudo experimental de microrreservatórios para controle do escoamento superficial*. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL. Retrieved from [http://www.livrosgratis.com.br/arquivos\\_livros/ea000220.pdf](http://www.livrosgratis.com.br/arquivos_livros/ea000220.pdf)
- Allerton, G., & Pittner, C. (2010). *SUDS FOR ROADS* (4th ed.). Edinburgh: WSP Development and Transportation.
- Anta Álvarez, J., Puertas Agudo, J., Suárez López, Jo., D. Rio Cambeses, H., & Hernandez Oubiña, D. (2008). Gestión de las Aguas Pluviales en Ámbito Urbano. In Materia (Ed.), *GESTION DE LAS AGUAS PLUVIALES - IMPLICACIONES SISTEMAS SANEAMIENTO* (pp. 381–398). Madrid España: Materia. Retrieved from [https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0CEkQFjAE&url=http%3A%2F%2Fwww.geama.org%2Fsanitaria%2Findex.php%3Fo%3Ddownloads%26i%3D155&ei=AAhpU4COMezmsATPgYKoCQ&usg=AFQjC NHqtJ7eJqA4pZN5gc\\_eEjmAj7KD5Q&sig2=4fnVnHwan94zj0nlvXRQsg&bvm=bv.66111022,d.cWc](https://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=5&cad=rja&uact=8&ved=0CEkQFjAE&url=http%3A%2F%2Fwww.geama.org%2Fsanitaria%2Findex.php%3Fo%3Ddownloads%26i%3D155&ei=AAhpU4COMezmsATPgYKoCQ&usg=AFQjC NHqtJ7eJqA4pZN5gc_eEjmAj7KD5Q&sig2=4fnVnHwan94zj0nlvXRQsg&bvm=bv.66111022,d.cWc)
- Calderon, D. (2014). Dr. Calderon Labs. *Dr, Calderón Labs*. Retrieved October 26, 2013, from [http://www.drcalderonlabs.com/Aparatos/Tensiometro\\_de\\_Manometro/Tensiometer Service, Testing and Calibration.htm](http://www.drcalderonlabs.com/Aparatos/Tensiometro_de_Manometro/Tensiometer Service, Testing and Calibration.htm)
- California Department of Transportation. (2012). *Biofiltration Swale Design Guidance September 2012*. Retrieved from <http://www.dot.ca.gov/hq/LandArch/ec/stormwater/guidance/DG-Biofiltration Swale-092712.pdf>
- CIRIA. (2007). *CIRIA 2007 The SUDS manual*. (CIRIA, Ed.). London: Construction Industry Research & Information Association (CIRIA). Retrieved from [http://www.ciria.org/Resources/Free\\_publications/the\\_suds\\_manual\\_PDF.aspx](http://www.ciria.org/Resources/Free_publications/the_suds_manual_PDF.aspx)
- Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland. (2007). *Bioretention Manual*. (Department of Environmental Resources The Prince George's County Maryland, Ed.). Maryland. Retrieved from [http://www.aacounty.org/DPW/Highways/Resources/Raingarden/RG\\_Bioretention\\_P G CO.pdf](http://www.aacounty.org/DPW/Highways/Resources/Raingarden/RG_Bioretention_P G CO.pdf)
- Dietrich, S. (2013). Infiltración y recarga a través del suelo y zona no saturada en áreas de llanura . Caracterización en base a la aplicación de tomografía eléctrica y trazadores, 1–187.
- Drainage, U., & District, F. C. (2016). *Urban Storm Drainage Vol 1* (Vol. 1).
- EAAB. (2009). *Norma Técnica NS-085 (EAAB)*. (EAAB, Ed.) (2nd ed.). Bogotá.
- EPA. (1999). Storm Water Technology Fact Sheet Bioretention. *Epa*, 8.
- EPA. (2004a). *Stormwater Best Management Practice Design Guide : Volume 1 General Considerations*. (EPA, Ed.) *United States Environmental Protection Agency* (Vol. 1). CINCINNATI, OH 45268. Retrieved from

- <http://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/901X0A00.PDF?Dockey=901X0A00.PDF>
- EPA. (2004b). *Stormwater Best Management Practice Design Guide: Volume 2*. (EPA, Ed.) *United States Environmental Protection Agency* (Vol. 2). CINCINNATI, OH 45268.
- EPA. (2004c). *Stormwater Best Management Practice Design Guide: Volume 3*. (EPA, Ed.) *United States Environmental Protection Agency* (Vol. 3). CINCINNATI, OH 45268.
- Esperanza, G., Aristizabal, L., Anibal, J., Mazo, Z. E. A., Antonio, J., & Ramirez, E. (2000). CIRCULACION GENERAL DEL TROPICO Y LA ZONA DE CONFLUENCIA, 31–38.
- FAO. (2009). *Guía para la descripción de suelos* (Cuarta.). Roma. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Guía+para+la+descripción+de+suelos#0>
- Fetter, C. (1994). *Applied hydrogeology*. (Prentice-Hall Inc., Ed.) (4th ed., Vol. 1). New Jersey: Pearson Education. Retrieved from <http://library.dmr.go.th/library/TextBooks/2679.pdf>
- Forero, J. A. L. (2012). *APLICACIÓN DE UN MODELO UNIDIMENSIONAL PARA FLUJO EN SUELOS SATURADOS Y NO SATURADOS Y TRANSPORTE DE HERBICIDAS. APLICACIÓN EN ZONA CENTRO DE LA PROVINCIA DE CÓRDOBA*.
- García Haba, E. (2011). *CONTROL DE ESCORRENTÍAS URBANAS MEDIANTE PAVIMENTOS PERMEABLES: APLICACIÓN EN CLIMAS MEDITERRÁNEOS Intensificación: Autor: Máster en Ingeniería Hidráulica y Medio*. Retrieved from [http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15383/TFM\\_EGH.pdf?sequence=1](http://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/15383/TFM_EGH.pdf?sequence=1)
- HeTPro. (2014). HeTPro. Alejandro Marquez. Retrieved from <http://hetpro-store.com/TUTORIALES/bnbnbn/sensores-analogicos/water-flow-sensor-sensor-de-flujo/>
- Hincapié Gómez, E. (2011). *Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera Estudio y modelación del movimiento del agua en suelos volcánicos de ladera*. Universidad Nacional de Colombia.
- IDEAM - Instituto de Hidrología, M. y E. A. (2004). *Estudio de la Caracterización Climática de Bogotá*. Retrieved from <https://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/Bvirtual/020702/020702.htm>
- Ingeominas. (1996). *Mapa de Microzonificación Geotécnica de Bogotá*. Bogotá. Retrieved from [http://seisan.ingeominas.gov.co/RSNC/Mapa\\_Zonifica\\_Geotecnica.pdf](http://seisan.ingeominas.gov.co/RSNC/Mapa_Zonifica_Geotecnica.pdf)
- INVIAS. (2013). Sección 200. In *Manual de Normas de Ensayos de Materiales para Carreteras* (p. 342).
- J. Šimůnek, M. Šejna, H. Saito, M. Sakai, and M. T. van G. (2013). *The HYDRUS-1D software package for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media*. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:The+HYDRUS-1D+Software+Package+for+Simulating+the+One-Dimensional+Movement+of+Water,+Heat,+and+Multiple+Solute+in+Variably-Saturated+Media#2>
- Kennedy/Jenks Consultants. (2007). *The Truckee Meadows Regional Stormwater Quality Management Program Low Impact Development Handbook*. Retrieved from

- <https://www.reno.gov/modules/showdocument.aspx?documentid=10761>
- Leidy Franco. (2015). *Elementos convencionales y no convencionales para la captación del drenaje urbano de aguas lluvias*. Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.
- Lucas, W. C. (2005). *GREEN TECHNOLOGY : THE DELAWARE URBAN RUNOFF MANAGEMENT APPROACH STANDARDS , SPECIFICATIONS AND DETAILS FOR GREEN TECHNOLOGY BMPs TO MINIMIZE STORMWATER IMPACTS FROM LAND DEVELOPMENT*. Delaware. Retrieved from [http://www.dnrec.state.de.us/DNREC2000/Divisions/Soil/Stormwater/New/GT\\_Std%26 Specs\\_06-05.pdf](http://www.dnrec.state.de.us/DNREC2000/Divisions/Soil/Stormwater/New/GT_Std%26 Specs_06-05.pdf)
- MARC, & APWA. (2003). *Manual of best management practices for stormwater quality. ... /APWA, Kansas City, ... Kansas*. Retrieved from [http://kcmetro.apwa.net/chapters/kcmetro/specs/2012 BMP Manual May-15-2012\\_CombinedDraft.pdf](http://kcmetro.apwa.net/chapters/kcmetro/specs/2012 BMP Manual May-15-2012_CombinedDraft.pdf)
- Maritz, M. (1990). Water sensitive urban design. *Australian Journal of Soil and Water Conservation*, 3, 36. Retrieved from <http://www.cabdirect.org/abstracts/19911959307.html>
- Maryland Department of the Environment. (2009a). *Maryland Stormwater Design Manual vol.1*.
- Maryland Department of the Environment. (2009b). *Maryland Stormwater Design Manual vol.2. Maryland Department of the Environment. Baltimore, ... (one., Vol. 2)*. Maryland: Maryland Department of the Environment in cooperation with the Maryland Department of Natural Resources Coastal Zone Management Program pursuant to National Oceanic and Atmospheric Administration Award No. NA67OZ0302. Retrieved from <http://www.mde.state.md.us/programs/Water/StormwaterManagementProgram/Soil ErosionandSedimentControl/Documents/MD SWM Volume 2.pdf>
- Monash University. (2009). *Adoption Guidelines for Stormwater Biofiltration Systems*.
- Motorola Inc. (2003). *Sensor Device Data Book* (5th ed.). Denver.
- Mutis, J. (2008). *Manual de Silvicultura Urbana para Bogotá*. Bogotá. Retrieved from <http://www.jbb.gov.co/jardin/images/stories/publicaciones/7. Manual de Silvicultura Urbana para Bogot%C3%A1.pdf>
- North Carolina State University, Jones, M. P., & Hunt, W. F. (2011). *Stormwater Best Management Practice Desing Manual*. North Carolina: NORTH CAROLINA COOPERATIVE EXTENSION. doi:10.1007/SpringerReference\_186958
- Oxer, J., & Blemings, H. (2009). *Cool Projects for Open Source Hardware Arduino*.
- Pujolràs, G. A. (2006). *Desarrollo y validación de un modelo de simulación de la dinámica del agua en el suelo. Aplicación al diseño agronómico y al manejo en riego localizado*. Universitat de Lleida. Retrieved from <http://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=7302&orden=0&info=link>
- Pujorlas, G. (2005). *DESARROLLO Y VALIDACIÓN DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE LA DINÁMICA DEL AGUA EN ELSUELO*.
- Saifadeen, A., & Gladnyeva, R. (n.d.). *Modeling of solute transport in the unsaturated zone*

- using HYDRUS-1D.
- Salas García, J. (2012). "Determinación espacial de la recarga en un acuífero mediante el diseño e instalación de instrumentación en pozos de monitoreo y un modelo numérico unidimensional de la infiltración en la zona vadosa." Universidad Autónoma del Estado De México.
- Scottish Environment Protection Agency (SEPA). (2002). *Sustainable Urban Drainage Systems: Setting The Scene In Scotland Booklet*. UK. Retrieved from [http://www.sepa.org.uk/water/water\\_publications/idoc.ashx?docid=b3eddd0c-e7b1-4143-bff9-bf7477cfb8ec&version=-1](http://www.sepa.org.uk/water/water_publications/idoc.ashx?docid=b3eddd0c-e7b1-4143-bff9-bf7477cfb8ec&version=-1)
- Secretaría Distrital de Bogotá. (2011). *Sistema Urbanos de Drenaje Sostenible. Ambiente, Secretaria Distrital de Medio*. Bogotá.
- Secretaría Distrital de Planeación de Bogotá. (2007). *Cartilla de Andenes*. Bogotá. Retrieved from <http://www.sdp.gov.co/portal/page/portal/PortalSDP/OrdenamientoTerritorial/EspacioPublico/DireccionTallerEspacioP%25FAblico/PublicacionesEspacioPublico/CartillaAndenes>
- Šimůnek, J., Angulo-Jaramillo, R., Schaap, M. G., Vandervaere, J.-P., & van Genuchten, M. T. (1998). Using an inverse method to estimate the hydraulic properties of crusted soils from tension-disc infiltrometer data. *Geoderma*, 86(1–2), 61–81. doi:10.1016/S0016-7061(98)00035-4
- Šimůnek, J., Šejna, M., & Genuchten, M. T. van. (2012). HYDRUS: MODEL USE, CALIBRATION, AND VALIDATION. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 55(4), 1261–1274.
- Texas Instruments. (2013). *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors. National Semiconductor Corporation, Literature ...* Retrieved from <http://www.ti.com/lit/gpn/lm35>
- USDA. (2009). *SOIL SURVEY FIELD AND LABORATORY METHODS MANUAL*.

ANEXOS