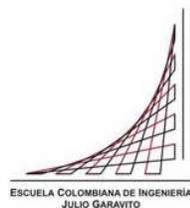


Maestría en Ingeniería Civil

Estudio de un modelo físico a escala de un desarenador, para establecer la eficiencia de tres tipos de pantallas deflectoras.

Pablo Gabriel Henao Arbeláez

Bogotá, D.C., 5 de mayo de 2021



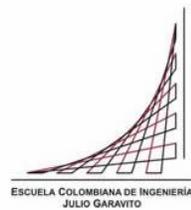
Estudio de un modelo físico a escala de un desarenador, para establecer la eficiencia de tres tipos de pantallas deflectoras.

Tesis para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente

Héctor Matamoros Rodríguez

Director

Bogotá, D.C., 5 de mayo de 2021



La tesis de maestría titulada “Estudio de un modelo físico a escala de un desarenador, para establecer la eficiencia de tres tipos de pantallas deflectoras”, presentada por Pablo Gabriel Henao Arbeláez, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Recursos Hidráulicos y Medioambiente.

Director de la tesis

Héctor Matamoros Rodríguez

Jurado

Germán Ricardo Santos Granados

Jurado

Andrés Humberto Otálora Carmona

Bogotá, D.C., día - mes - año (fecha de aceptación del trabajo por parte del jurado)

Dedicatoria

A mi madre, María del Carmen Arbeláez Tigreros; a mi padre, Pablo Gabriel Henao Valbuena; a mi hija, Gabriela Verónica Henao Alba; a mi pareja, Carolina Alba Méndez, y a toda mi familia, que son el motor de mi vida y mi mayor motivación para ser una mejor persona, un gran profesional y un buen ciudadano, y me animan a aportar desde mi campo de conocimiento para construir un mejor país.

Agradecimientos

Agradezco al director de tesis, Héctor Matamoros Rodríguez, por su confianza, apoyo y colaboración, y por compartir su conocimiento y experiencia.

Así mismo, a los profesionales que compartieron su conocimiento conmigo en las diversas asignaturas, lo cual me ha permitido ampliar mi visión académica y profesional.

Resumen

El funcionamiento eficiente de las estructuras hidráulicas de desarenado depende, en gran medida, de las condiciones más cercanas al flujo uniforme, que sea unidimensional en la zona de sedimentación. El componente principal de la estructura para lograr dicho objetivo es la denominada pantalla deflectora, la cual se encarga de distribuir la masa de flujo a lo alto y ancho de la sección transversal de la estructura. En la bibliografía consultada se encuentran recomendaciones sobre la forma y el funcionamiento de los componentes de los deflectores. En este trabajo de investigación se pretende establecer su eficiencia, y mediante la relación de este parámetro con el número de Hazen hacer recomendaciones de diseño para este tipo de estructuras hidráulicas, de tal manera que se garantice la eficiencia esperada.

El funcionamiento adecuado de la estructura de desarenado depende de la efectividad de las pantallas deflectoras, que generen un flujo lo más uniforme posible en la zona de sedimentación. Entre las posibles causas de este problema se encuentran los diseños incorrectos, la modificación de la estructura por desconocimiento de las funciones de sus componentes y ausencia o deficiencia en su mantenimiento. Entre los efectos están los siguientes: desconocimiento de la eficiencia real de la estructura y del comportamiento de sus partículas de sedimento; sobredimensionamiento de la estructura, ocasionando sobrecostos, o subdimensionamiento, generando un desempeño deficiente, y destrucción de las pantallas deflectoras, lo cual reduce la efectividad de remoción de la estructura.

En resumen, debido a la dependencia del buen funcionamiento de la estructura del desarenador, del tipo de pantallas deflectoras y del número de Hazen, se hace necesario actualizar la tabla de diseño.

Contenido

Introducción	17
Objetivos	18
Principal	18
Específicos	18
1. Marco referencial	19
1.1 Antecedentes	19
1.2 Marco teórico	20
1.2.1 Método de diseño	20
1.2.2 NTC 1522 Ensayo para determinar la granulometría por tamizado	30
1.2.3 Instructivo de ensayo determinación de sólidos sedimentables SM2540F	36
1.3 Marco legal.....	40
2. Diseño	41
2.1 Diseño del desarenador	41
2.1.1 Condiciones de diseño del desarenador.....	41
2.1.2 Dimensiones del diseño.....	43
2.1.3 Vertedero de salida.....	46
2.1.4 Diseño de la zona de entrada.....	46
2.1.5 Pantalla deflectora y orificios.....	47
2.1.6 Tolva de lodos	48
2.2 Construcción del modelo desarenador en CAD 3D	49
2.3 Despiece del modelo 3D	53
2.4 Ensamblaje del modelo del desarenador en acrílico.....	57
2.5 Construcción de la estructura metálica.....	61
2.6 Pruebas de retención del fluido en el acrílico.....	66

2.7	Materiales para el montaje hidráulico del modelo	67
2.7.1	Tanques de almacenamiento de 250 litros	67
2.7.2	Bomba hidráulica con capacidad de paso de sedimentos	68
2.7.3	Tuberías o mangueras.....	70
2.7.4	Motor de 110 V de ½ HP	70
2.7.1	Aspas para la mezcla	71
2.7.1	Válvulas.....	71
2.1	Montaje hidráulico del sistema	72
2.1.1	Tanque inicial, motor de 110 V y aspas de mezcla	73
2.1.1	Motobomba agrícola, mangueras de succión e impulsión.....	74
2.1.1	Tanque elevado, manguera de alimentación y pantallas deflectoras	74
2.1.1	Sistema completo	75
2.1.2	Resumen del montaje hidráulico del sistema	76
3.	Ensayos de laboratorio	77
3.1	Laboratorios de granulometría	77
3.1.1	Laboratorio de granulometría 1 (muestra inicial).....	78
3.1.1	Laboratorio de granulometría 2 (muestra triturada)	81
3.1.1	Laboratorio de granulometría 3 (muestra inicial mas muestra triturada)	83
3.1	Laboratorios de sedimentación.....	85
3.1.1	Ensayo 1. Pantalla deflectora ubicada horizontalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal mayor	90
3.1.2	Ensayo 2. Pantalla deflectora ubicada horizontalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal medio.....	92
3.1.3	Ensayo 3. Pantalla deflectora ubicada horizontalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal menor	93

3.1.4	Ensayo 4. Pantalla deflectora ubicada verticalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal mayor	94
3.1.5	Ensayo 5. Pantalla deflectora con 20 orificios ubicada verticalmente, evaluado con el caudal medio	97
3.1.6	Ensayo 6. Pantalla deflectora con 20 orificios ubicada verticalmente, evaluado con el caudal menor	98
3.1.7	Ensayo 7. Pantallas deflectoras con 9 orificios (verticalmente) y 11 orificios (horizontalmente), evaluado con el caudal mayor.....	100
3.1.8	Ensayo 8. Pantallas deflectoras vertical con 9 orificios y horizontal con 11 orificios, evaluado con el caudal medio	102
3.1.9	Ensayo 9. Pantallas deflectoras vertical con 9 orificios y horizontal con 11 orificios, evaluado con el caudal menor	103
4.	Análisis de resultados.....	105
4.1	Ensayo 1	105
4.2	Ensayo 2	106
4.3	Ensayo 3	107
4.4	Ensayo 4	108
4.5	Ensayo 5	109
4.6	Ensayo 6	110
4.7	Ensayo 7	111
4.8	Ensayo 8	112
4.9	Ensayo 9	113
4.10	Análisis de resultados. Número de Hazen (diseño).....	114
4.11	Análisis de resultados. Número de Hazen (ensayos).....	114
4.11.1	Cálculo del número de Hazen (ensayo 1).....	115
4.11.2	Cálculo del número de Hazen (ensayo 2).....	115

4.11.3	Cálculo del número de Hazen (ensayo 3).....	116
4.11.4	Cálculo del número de Hazen (ensayo 4).....	116
4.11.5	Cálculo del número de Hazen (ensayo 5).....	117
4.11.6	Cálculo del número de Hazen (ensayo 6).....	117
4.11.7	Cálculo del número de Hazen (ensayo 7).....	118
4.11.8	Cálculo del número de Hazen (ensayo 8).....	118
4.11.9	Cálculo del número de Hazen (ensayo 9).....	119
5.	Conclusiones	122
6.	Referencias bibliográficas	124

Índice de tablas

Tabla 1. Clasificación del material en suspensión, según tamaño	20
Tabla 2. Viscosidad cinemática del agua	25
Tabla 3. Densidad del agua	25
Tabla 4. Número de Hazen (V_s/V_0).....	30
Tabla 5. Masa de la muestra, de acuerdo con el tamaño nominal	32
Tabla 6. Formato sugerido para el tamizado granulométrico.....	34
Tabla 7. Control de calidad método 2540 f.....	37
Tabla 8. Número de Hazen.....	42
Tabla 9. Laboratorio de granulometría 1 (muestra inicial).....	78
Tabla 10. Laboratorio de granulometría 2 (muestra triturada).....	81
Tabla 11. Laboratorio de granulometría 3 (muestra inicial más muestra triturada).....	83
Tabla 12. Medición de caudal (Ensayo 1).....	91
Tabla 13. Datos de las muestras (Ensayo 1).....	91
Tabla 14. % de remoción de las muestras (Ensayo 1).....	91
Tabla 15. Medición del caudal (Ensayo 2).....	92
Tabla 16. Datos de las muestras (Ensayo 29).....	93
Tabla 17. % de remoción de las muestras (Ensayo 2).....	93
Tabla 18. Medición del caudal (Ensayo 3).....	93
Tabla 19. Datos de las muestras (Ensayo 3).....	94
Tabla 20. % de remoción de las muestras (Ensayo 3).....	94
Tabla 21. Medición del caudal (Ensayo 4).....	96
Tabla 22. Datos de las muestras (Ensayo 4).....	96
Tabla 23. % de remoción de las muestras (Ensayo 4).....	96
Tabla 24. Medición del caudal (Ensayo 5).....	97

Tabla 25. Datos de las muestras (Ensayo 5).....	98
Tabla 26. % de remoción de las muestras (Ensayo 5).....	98
Tabla 27. Medición del caudal (Ensayo 6).....	99
Tabla 28. Datos de las muestras (Ensayo 6).....	99
Tabla 29. % de remoción de las muestras (Ensayo 6).....	99
Tabla 30. Medición del caudal (Ensayo 7).....	101
Tabla 31. Datos de las muestras (Ensayo 7).....	101
Tabla 32. % de remoción de las muestras (Ensayo 7).....	102
Tabla 33. Medición del caudal (Ensayo 8).....	102
Tabla 34. Datos de las muestras (Ensayo 8).....	103
Tabla 35. % de remoción de las muestras (Ensayo 8).....	103
Tabla 36. Medición del caudal (Ensayo 9).....	104
Tabla 37. Datos de las muestras (Ensayo 9).....	104
Tabla 38. % de remoción de las muestras (Ensayo 9).....	104
Tabla 39. Resultados, porcentaje de remoción y número de Hazen.....	119
Tabla 40. Tiempo de retención hidráulico y caudal unitario.....	120
Tabla 41. Tabla de coeficiente de Hazen agregando tres valores obtenidos	121

Índice de ilustraciones

Ilustración 1. Planta del desarenador.....	22
Ilustración 2. Corte longitudinal del desarenador	22
Ilustración 3. Planta del desarenador.....	27
Ilustración 4. Cuarteo de la muestra.....	31
Ilustración 5. Papel para curva granulométrica	35
Ilustración 6. Diagrama del procedimiento de ensayo de sedimentación	39
Ilustración 7. Coeficiente de Hazen	42
Ilustración 8. Variación de los coeficientes de descarga (C_d), velocidad (C_v) y contracción (CC_c) con el número de Reynolds en un orificio circular.	48
Ilustración 9. Vistas superior e inferior del modelo en 3D	49
Ilustración 10. Vistas frontal y posterior del modelo en 3D.....	49
Ilustración 11. Vista derecha del modelo en 3D	50
Ilustración 12. Vista izquierda del modelo en 3D.....	50
Ilustración 13. Vista superior - frontal - derecha en 3D.....	51
Ilustración 14. Vista superior - posterior - derecha en 3D	51
Ilustración 15. Vista superior - posterior- izquierda en 3D.....	52
Ilustración 16. Vista superior - frontal - izquierda en 3D	52
Ilustración 17. Tres tipos de pantallas deflectoras en 3D.....	53
Ilustración 18. Lámina 1 (2,4 x 1,2 m).....	54
Ilustración 19. Lámina 2 (2,4 x 1,2 m).....	55
Ilustración 20. Lámina 3 (2,4 x 1,2 m).....	56
Ilustración 21. Transporte del material en acrílico.....	57
Ilustración 22. Pieza más grande (2,13 x 1,07 m)	57

Ilustración 23. Piezas medianas	58
Ilustración 24. Piezas pequeñas.....	58
Ilustración 25. Pegado de la cámara de entrada	59
Ilustración 26. Ensamblaje del modelo en acrílico.....	59
Ilustración 27. Modelo en acrílico.....	60
Ilustración 28. Modelo en acrílico con los pegues reforzados	60
Ilustración 29. Ubicación de la parte inferior de la estructura metálica	61
Ilustración 30. Parte inferior de la estructura metálica.....	61
Ilustración 31. Tornillos niveladores de la estructura metálica.....	62
Ilustración 32. Construcción de los ángulos de cierre de la estructura metálica	62
Ilustración 33. Templetes para atornillar la estructura en la parte superior	63
Ilustración 34. Paralelos metálicos para el empuje lateral	63
Ilustración 35. Limpieza y lijado de los residuos de soldadura.....	64
Ilustración 36. Modelo en acrílico y estructura metálica pintada.....	64
Ilustración 37. Vistas frontal y posterior del modelo	65
Ilustración 38. Transporte del modelo hidráulico hacia la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito.....	65
Ilustración 39. Modelo lleno al 50%	66
Ilustración 40. Modelo lleno al 75%	66
Ilustración 41. Modelo lleno al 100%	67
Ilustración 42. Tanque bajito de 250 litros.....	67
Ilustración 43. Equipo de riego portátil 1,8 Hp AC1AG41, marca Evans	68
Ilustración 44. Especificaciones técnicas del equipo de riego portátil 1,8 Hp AC1AG41, marca Evans	69
Ilustración 45. Manguera transparente trenzada en PVC de una pulgada	70

Ilustración 46. Motor de 110 V de ½ HP	70
Ilustración 47. Aspas para equiparlas en el motor.....	71
Ilustración 48. Válvulas de bola.....	71
Ilustración 49. Montaje hidráulico del sistema	72
Ilustración 50. Tanque inicial, motor y aspas de mezcla.....	73
Ilustración 51. Motobomba agrícola, mangueras de succión e impulsión	74
Ilustración 52. Tanque elevado y manguera de alimentación al sistema	74
Ilustración 53. Pantalla deflectora horizontal con 20 orificios.....	75
Ilustración 54. Secuencia del sistema completo.....	75
Ilustración 55. Muestra de la antracita seleccionada.....	77
Ilustración 56. Antracita seleccionada para triturar.....	77
Ilustración 57. Curva granulométrica 1 (muestra inicial).....	79
Ilustración 58. Triturador de material	80
Ilustración 59. Antracita triturada	80
Ilustración 60. Curva granulométrica 2 (muestra triturada)	82
Ilustración 61. Curva granulométrica 3 (muestra inicial mas muestra triturada)	84
Ilustración 62. Medición del material para el ensayo.....	85
Ilustración 63. Material para el ensayo	85
Ilustración 64. Muestras pesadas para un laboratorio	86
Ilustración 65. Medición del material para el ensayo.....	86
Ilustración 66. Conos Imhoff y soporte de conos en madera	87
Ilustración 67. Probeta de plástico y cronómetro para medir el caudal.....	88
Ilustración 68. Sedimentos del Ensayo 1 (muestra inicial)	89
Ilustración 69. Sedimentos del Ensayo 1 (muestra final).....	89
Ilustración 70. Pantalla deflectora horizontal con 20 orificios, ubicada en el modelo hidráulico.....	90

Ilustración 71. Pantalla deflectora vertical con 20 orificios	95
Ilustración 72. Pantallas deflectoras del modelo hidráulico (vertical con 9 orificios y horizontal con 11 orificios).....	100
Ilustración 73. % de remoción (Ensayo 1)	105
Ilustración 74. Porcentaje de remoción (Ensayo 2).....	106
Ilustración 75. Porcentaje de remoción (Ensayo 3).....	107
Ilustración 76. Porcentaje de remoción (Ensayo 4).....	108
Ilustración 77. Porcentaje de remoción (Ensayo 5).....	109
Ilustración 78. Porcentaje de remoción (Ensayo 6).....	110
Ilustración 79. Porcentaje de remoción (Ensayo 7).....	111
Ilustración 80. Porcentaje de remoción (Ensayo 8).....	112
Ilustración 81. Porcentaje de remoción (Ensayo 9).....	113
Ilustración 82. Porcentaje de remoción vs. Número de Hazen por tipo de pantalla.....	120
Ilustración 83. Porcentaje de remoción vs. Número de Hazen.....	121

Introducción

Los desarenadores son estructuras hidráulicas destinadas a retirar la mayor cantidad de partículas granulares del agua, para permitir que las aducciones funcionen de forma adecuada, disminuyendo el riesgo de taponamiento por acumulación de sedimentos en los puntos bajos del sistema.

En general, esta estructura consiste en un tanque, o sistema de tanques, que se ubican lo más cerca posible de la bocatoma, con el fin de sedimentar la mayor cantidad factible de partículas en suspensión. La sedimentación se logra mediante la reducción de la velocidad de flujo, permitiendo la acción de la fuerza de gravedad, que disminuye la acción de arrastre debida al flujo y a los esfuerzos de corte de origen turbulento.

Los desarenadores pueden retirar partículas de gravas, arenas, e incluso, arcillas, de acuerdo con las características geométricas del tanque. Normalmente pueden remover fácilmente partículas hasta del tamaño arena. Su principio básico es ampliar la sección de sistema para reducir la velocidad del flujo, bajando los esfuerzos cortantes, lo cual permite la acción de la gravedad y el retiro por sedimentación de los sólidos.

Los desarenadores no son 100% eficientes durante este proceso, debido a que el flujo no es realmente uniforme en la sección, entre otras razones por los flujos secundarios, las corrientes térmicas, la acción del viento, las zonas muertas y la mala distribución de las pantallas deflectoras. No obstante, se pueden remover partículas de menor diámetro por estas mismas razones. Para tener en cuenta estos factores en el diseño se ha introducido un elemento de seguridad en el que se obtiene mayor eficiencia en el porcentaje de remoción de partículas, relacionando las características de las pantallas deflectoras con el número de Hazen.

Este trabajo de grado implementa la experimentación física de una estructura de desarenado con tres tipos de pantallas deflectoras, para medir la eficiencia en el porcentaje de remoción de las partículas.

Objetivos

Principal

Estudiar el modelo físico de un desarenador a escala para determinar, mediante la medición de la eficiencia de la estructura, su capacidad para remover sedimentos con diversos tipos de pantallas deflectoras y su incidencia sobre el buen comportamiento hidráulico en la zona de sedimentación, que se refleja en un buen o mal desarenado.

Específicos

- Diseñar la estructura de un desarenador.
- Dimensionar el modelo físico de un desarenador.
- Construir diversos tipos de sistemas deflectores.
- Ensayar el comportamiento hidráulico con diferentes opciones de pantallas deflectoras y determinar su eficiencia en la remoción de sedimentos.
- Hacer recomendaciones sobre los tipos más eficientes de pantallas deflectoras.

1. Marco referencial

1.1 Antecedentes

Las estructuras de desarenación son sistemas hidráulicos diseñados para remover las partículas suspendidas que transporta el agua desde el punto de captación. Anteriormente no se tenían en cuenta en la construcción de los planes maestros de acueducto; sin embargo, se empezaron a presentar problemas y se hizo necesaria su implementación por los daños en el sistema de transporte, debido a la abrasión que generaban las partículas que arrastraba el flujo y a la colmatación de algunas estructuras y válvulas. Se empezaron a construir de manera empírica estructuras para remover las partículas, pero su efectividad mostraba diferentes valores de remoción, debido a que se instalaban en distintos lugares con las mismas dimensiones.

No existe un registro exacto de la fecha en que se construyó la primera estructura hidráulica de desarenación, pero a medida que ha transcurrido el tiempo se ha integrado al proceso de diseño como un aspecto importante en la construcción de los planes maestros de acueducto.

El Reglamento técnico para el sector de agua potable y saneamiento básico, RAS 2000 y RAS 2017, implementó en Colombia una forma sencilla y simplificada para diseñar los tanques o estructuras de desarenación, convirtiéndose en un referente para las áreas urbana y rural.

El ingeniero Ricardo Alfredo López Cualla, en su libro *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillado* (2003), planteó un método con base en las normas colombianas para el diseño de estructuras de desarenación, teniendo en cuenta la eficiencia deseada y el comportamiento hidráulico teórico que presentan las partículas en su sedimentación.

1.2 Marco teórico

Para el desarrollo de este trabajo de investigación práctico se tomaron en consideración las siguientes teorías de diseño y normas aplicables para ensayos de laboratorio:

1.2.1 Método de diseño

El método que se utilizó para definir las dimensiones del modelo de desarenador se tomó del libro *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*, del ingeniero Ricardo Alfredo López Cualla (2003).

1.2.1.1 Generalidades

Un desarenador convencional es un tanque cuya finalidad es sedimentar partículas en suspensión por la acción de la gravedad. Aunque este elemento se constituye en un tratamiento primario, en algunos casos es necesario realizar un tratamiento convencional de purificación de aguas.

El desarenador debe ubicarse lo más cerca posible de la bocatoma, con el fin de evitar problemas de obstrucción en la línea de aducción.

El material en suspensión que transporta el agua está constituido básicamente por arcilla, arena o grava fina. A continuación se presenta la clasificación del material, de acuerdo con el tamaño de las partículas (tabla 1).

Tabla 1. Clasificación del material en suspensión, según tamaño

Material	Diámetro (mm)	Material	Diámetro (mm)
Gravilla		Fango	
Gruesa	>2,0	Grueso y medio	0,05 – 0,01
Fina	2,00 – 1,00	Fino	0,01 – 0,005
Arena		Arcilla	
Gruesa	1,00 – 0,50	Grueso y medio	0,005 – 0,001
Media	0,50 – 0,25	Fina	0,001 – 0,0001
Fina	0,25 – 0,10	Coloidal	< 0,0001
Muy fina	0,10 – 0,05		

Fuente: López Cualla (2003).

El objetivo del desarenador es remover partículas hasta del tamaño de arenas. La sedimentación se puede ayudar mediante el proceso de coagulación (empleo de químicos para remover partículas tamaño arcilla), con lo cual se logra que las partículas más pequeñas se aglomeren y sedimenten a una velocidad mayor. Más información sobre la coagulación se encuentra en libros relacionados con la purificación de aguas.

Un desarenador está dividido en las siguientes zonas:

Zona I. Cámara de quietamiento. Debido a la ampliación de la sección, el exceso de energía de velocidad en la tubería de llegada se disipa. El paso del agua a la zona siguiente se puede hacer a través de un canal de repartición con orificios sumergidos. Posteriormente se encuentra un vertedero de excesos que lleva el caudal sobrante de nuevo al río mediante una tubería que se une con la del lavado (Zona IV).

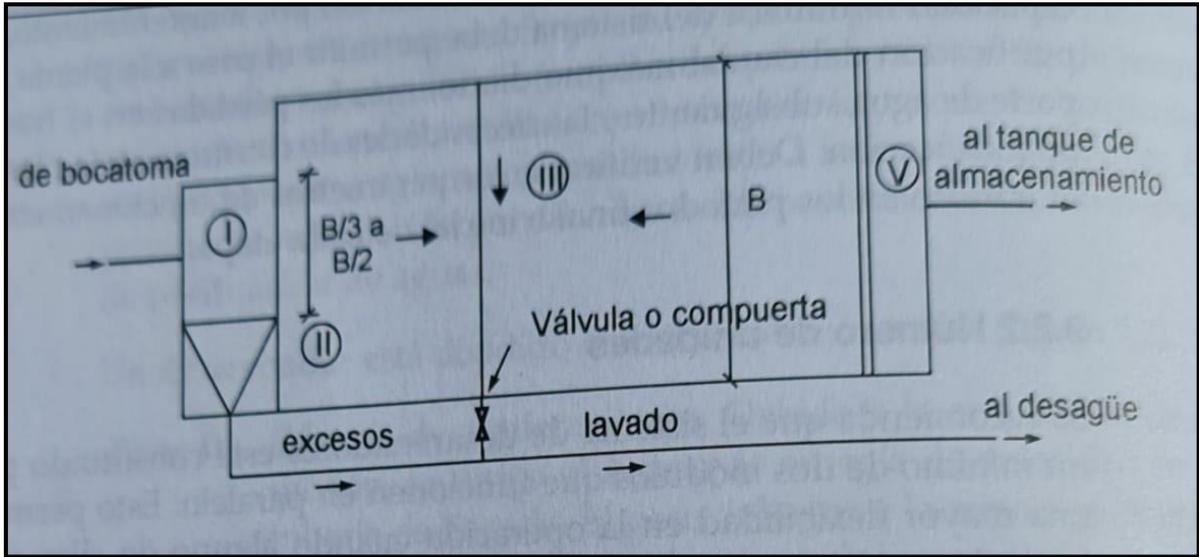
Zona II. Entrada al desarenador. Se ubica entre la cámara de quietamiento y una cortina, que obliga a las líneas de flujo a descender con rapidez, de manera que inicialmente se sedimenta el material más grueso.

Zona III. Zona de sedimentación. Es el lugar donde se acumulan las partículas restantes y en el que se cumplen con rigor las leyes de sedimentación. La profundidad útil de sedimentación es H .

Zona IV. Almacenamiento de lodos. Comprende el volumen entre la cota de profundidad útil en la zona III y el fondo del tanque. Este último tiene pendientes longitudinales y transversales hacia la tubería de lavado.

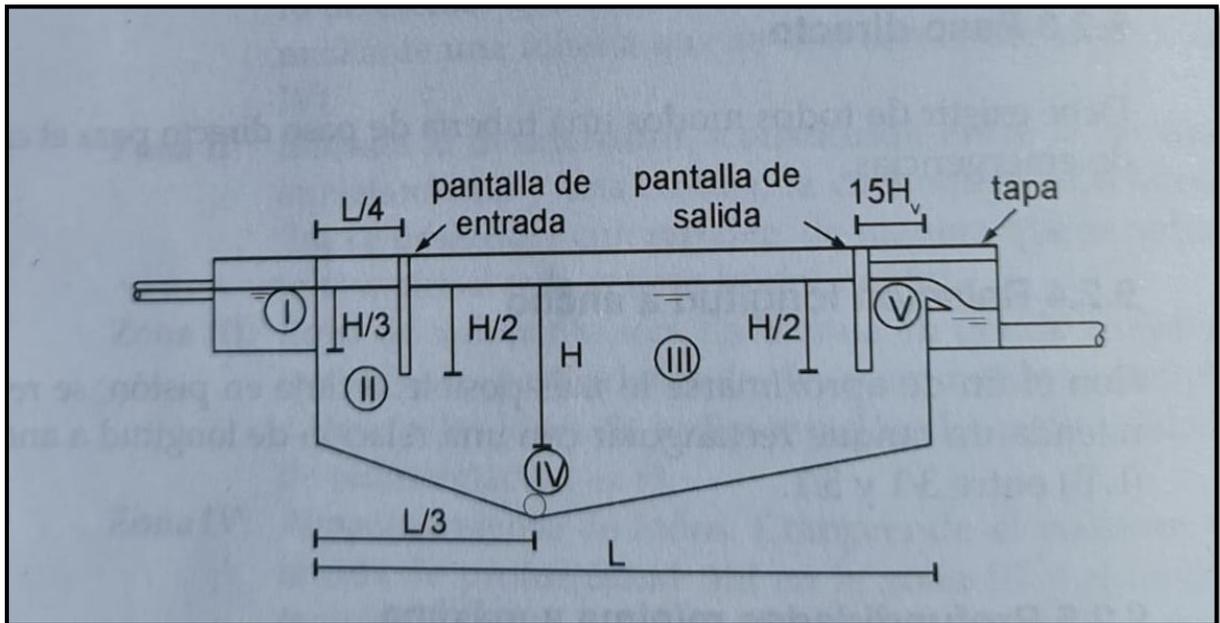
Zona V. Salida del desarenador. La constituyen una pantalla sumergida, un vertedero de salida y el canal de recolección. Esta zona debe estar completamente tapada para evitar la posible contaminación exterior.

Ilustración 1. Planta del desarenador



Fuente: López Cualla (2003).

Ilustración 2. Corte longitudinal del desarenador



Fuente: López Cualla (2003).

1.2.1.2 Especificaciones de diseño

- **Periodo y caudal de diseño**

En general, el periodo de diseño del desarenador es el mismo de la estructura de captación y puede ampliarse en etapas sucesivas hasta el horizonte de diseño. En caso de tener dos o más módulos, el dimensionamiento de cada uno debe corresponder al caudal medio diario. Al quedar un módulo fuera de servicio por mantenimiento, la capacidad hidráulica del sistema debe permitir el paso a la planta de purificación del caudal máximo diario, más las pérdidas en el transporte de agua subsiguiente y las necesidades de consumo en la planta de purificación. Así mismo, se deben verificar los parámetros de funcionamiento hidráulico en los periodos final e inicial de cada etapa.

- **Número de unidades**

Se recomienda que el sistema de desarenadores esté constituido por dos módulos que funcionen en paralelo. Esto permite una mayor flexibilidad en la operación cuando alguno de ellos esté fuera de servicio por razones de mantenimiento.

- **Paso directo**

En todo caso debe existir una tubería de paso directo por si se presenta alguna emergencia.

- **Relación longitud a ancho**

Con el fin de aproximarse lo máximo posible al flujo en pistón, se recomienda un tanque rectangular con una relación de longitud a ancho (L/B) entre 3/1 y 5/1.

- **Profundidades mínimas y máximas**

La profundidad mínima especificada es de 1,50 m y la máxima de 4,50 m.

- **Profundidad de almacenamiento de lodos y pendientes de la placa de fondo**

Se recomienda una relación de longitud a profundidad de almacenamiento de lodos aproximadamente de 10/1. La profundidad de lodos típica está comprendida entre 0,75 y 1,50 m, y llega a un máximo del 100% del valor de la profundidad útil de sedimentación.

Las pendientes del fondo deben estar comprendidas entre 5 y 8%, con el fin de que los lodos rueden fácilmente hacia la tubería de desagüe y la labor de limpieza manual sea segura.

- **Periodo de retención hidráulico**

El tiempo que tarde una partícula de agua en entrar y salir del tanque debe fluctuar entre 30 minutos y cuatro horas. Al final del horizonte de diseño, el periodo de retención hidráulico debe tender a ser corto, mientras que al comienzo del periodo éste tiende a ser largo.

- **Carga hidráulica superficial**

Esta carga, definida como el caudal puesto por unidad de área superficial, debe estar entre 15 y 80 m³/m²*d. Al final del periodo de diseño la carga hidráulica superficial será alta y al comienzo tenderá al límite inferior.

1.2.1.3 Teoría de la sedimentación

Esta teoría la desarrollaron Hazen y Stokes. Su modelo de sedimentación de partículas se resume en la siguiente ecuación, de la que se concluye que la velocidad de sedimentación de una partícula es directamente proporcional al cuadrado de su diámetro.

$$V_s = \frac{g}{18} \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} d^2 = Kd^2$$

En donde:

VS = velocidad de sedimentación de la partícula (cm/s)

g = aceleración de la gravedad (981 cm/s²)

ρ_s = peso específico de la partícula arenas = 2,65

ρ = peso específico del fluido agua = 1,00

μ = viscosidad cinemática del fluido (cm²/s)

Tabla 2. Viscosidad cinemática del agua

Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (cm²/s)	Temperatura (°C)	Viscosidad cinemática (cm²/s)
0	0,01792	18	0,01059
2	0,01763	20	0,01007
4	0,01567	22	0,00960
6	0,01473	24	0,00917
8	0,01386	26	0,00876
10	0,01308	28	0,00839
12	0,01237	30	0,00804
14	0,01172	32	0,00772
15	0,01146	34	0,00741
16	0,01112	36	0,00713

Fuente: López Cualla (2003).

Tabla 3. Densidad del agua

Densidad del agua (°C)					
Temperatura °C	Densidad kg/m³	Temperatura °C	Densidad kg/m³	Temperatura °C	Densidad kg/m³
0 (hielo)	917,0	33	994,7	67	979,3
0	999,8	34	994,4	68	978,7
1	999,8	35	994,0	69	978,2
2	999,9	36	993,7	70	977,6
3	1000,0	37	993,3	71	977,0
4	1000,0	38	993,0	72	976,4
5	999,9	39	992,6	73	976,8
6	999,9	40	992,2	74	975,2
7	999,9	41	991,8	75	974,6
8	999,9	42	991,4	76	974,0
9	999,8	43	991,0	77	973,4
10	999,7	44	990,6	78	972,8
11	999,6	45	990,2	79	972,2
12	999,5	46	989,8	80	971,6
13	999,4	47	989,3	81	970,9
14	999,3	48	988,9	82	970,3
15	999,1	49	988,4	83	969,6

Densidad del agua (°C)					
Temperatura	Densidad	Temperatura	Densidad	Temperatura	Densidad
°C	kg/m³	°C	kg/m³	°C	kg/m³
16	999,0	50	988,0	84	969,0
17	998,8	51	987,5	85	968,3
18	998,6	52	987,0	86	967,7
19	998,4	53	986,6	87	967,0
20	998,2	54	986,1	88	966,4
21	998,0	55	985,6	89	965,7
22	997,8	56	985,1	90	965,0
23	997,6	57	984,6	91	964,3
24	997,3	58	984,1	92	963,7
25	997,1	59	983,6	93	963,0
26	996,8	60	983,1	94	962,3
27	996,5	61	982,6	95	961,6
28	996,3	62	982,0	96	960,9
29	996,0	63	981,5	97	960,2
30	995,7	64	981,0	98	959,4
31	995,4	65	980,4	99	958,7
32	995,0	66	979,9	100	958,0

Fuente: López Cualla (2003).

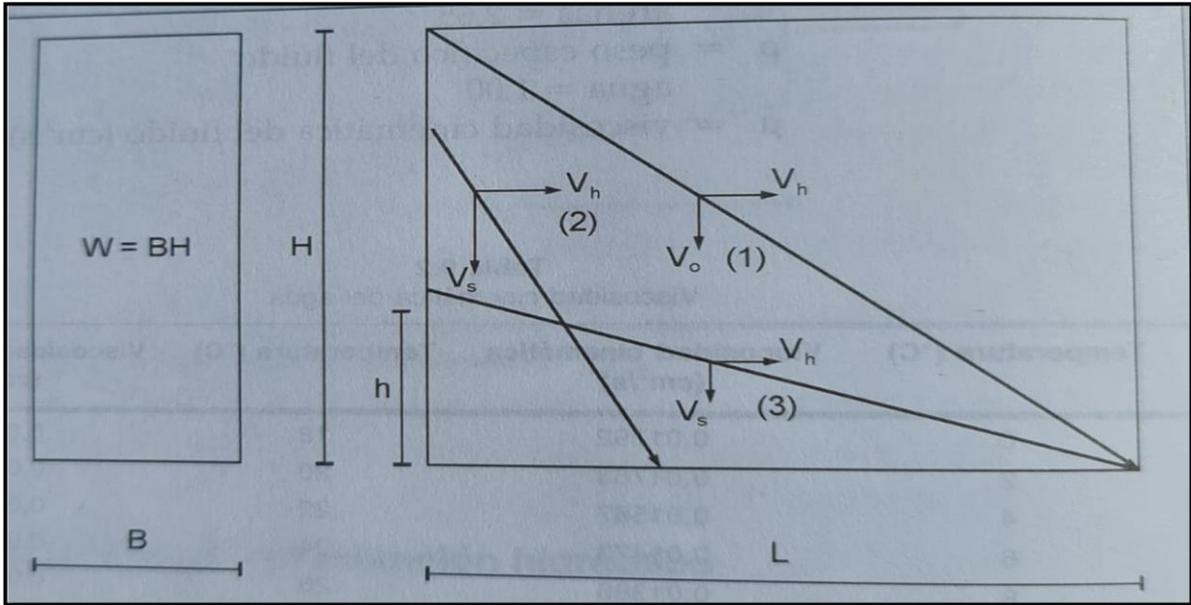
En el estudio de sedimentación se hacen las siguientes suposiciones teóricas:

- El flujo se reparte uniformemente a lo largo de la sección transversal (W).
- El agua se desplaza con velocidad uniforme a través del tanque.
- Toda partícula que toque el fondo antes de llegar a la salida será removida.

Adicionalmente, se desarrolla el estudio suponiendo que se debe mover una partícula cuyo diámetro es d , para lo cual se analiza su trayectoria a lo largo del tanque.

Como se observa en la siguiente ilustración (ilustración 3), la partícula de diámetro d más crítica es aquella que entra por la parte superior del tanque, debido a que debe recorrer una altura (H) y una longitud (L) más desfavorable antes de ser removida. Esta trayectoria crítica se indica en la ilustración. Dicha partícula tiene un componente de velocidad horizontal (V_h) y velocidad vertical (V_o), haciendo su recorrido en un tiempo (t).

Ilustración 3. Planta del desarenador



Fuente: López Cualla (2003).

En primer lugar, se remueven todas las partículas con igual componente de velocidad vertical (V_o), sin importar su punto de entrada. Igualmente, aquellas cuya velocidad de sedimentación (V_s) es mayor que V_o . Las partículas con V_s menor que V_o se pueden remover dependiendo de su nivel de entrada al tanque, h .

Por semejanza de triángulo, se tiene:

$$\frac{L}{V_h} = \frac{H}{V_o} \Rightarrow \frac{LW}{V_h W} = \frac{H}{V_o} \Rightarrow \frac{V}{Q} = \frac{H}{V_o}$$

Siendo V = volumen del tanque y Q = caudal. La velocidad de la partícula crítica V_o será:

$$V_o = \frac{HQ}{V} \Rightarrow V_o = \frac{Q}{A}$$

Siendo A = área superficial de $B \times L$.

Según la ecuación de Stokes:

$$V_s = \frac{g (\rho_s - \rho)}{18 \mu} d^2 = Kd^2$$

Remplazando la velocidad de la partícula crítica en la ecuación de Stokes, se tiene:

$$Kd^2 = \frac{Q}{A} \Rightarrow d = \sqrt{\frac{Q}{KA}}$$

Al analizar la ecuación se encuentra que para un caudal dado el diámetro de la partícula que se debe remover es función del área superficial del tanque.

La remoción de partículas también es función de la profundidad del tanque, ya que si ésta se disminuye se retiene la partícula con diámetro d en un tiempo menor, lo que equivale a decir que se retiene un número mayor de partículas con V_s menor que V_o .

La relación Q/A se denomina “carga hidráulica superficial (q)” y es igual a la velocidad de sedimentación de la partícula crítica (V_o).

Por otra parte, la relación V/Q se denomina “periodo de retención hidráulico” y H/V_o es el tiempo que tarda la partícula crítica en ser removida (t). En teoría, para remover esta partícula se debe cumplir que:

$$\frac{V}{\frac{Q}{H}} = 1$$

En la realidad el flujo no se distribuye uniformemente, debido a la limitación de las pantallas difusoras, a que las velocidades no son constantes porque existen corrientes térmicas y zonas muertas, a que el viento crea contracorrientes en la superficie y, finalmente, a que existe la resuspensión de partículas que han llegado al fondo. Como no se cumplen las suposiciones iniciales del desarrollo de la teoría, hay partículas removidas con V_s menores que V_o .

Se adopta, entonces, un factor de seguridad en función de:

1. Porcentaje de remoción de partículas con $V_s < V_o$.

$$\%remoción = \frac{N^\circ \text{ de partículas con } V_s < V_o}{N^\circ \text{ de partículas con } V_s \geq V_o} \times 100$$

2. Grado del desarenador (n):

La clasificación de la eficiencia de las pantallas deflectoras se hace a través del grado n del desarenador.

n = 1: deflectores deficientes o ausencia de ellos

n = 2: deflectores regulares

n = 3: deflectores buenos

n = 5 a 8: deflectores muy buenos

n $\rightarrow \infty$: caso teórico

La igualdad anterior queda así:

$$\frac{\theta}{t} = \frac{\frac{V}{Q}}{\frac{H}{V_s}} = \frac{V_s V}{HQ} = V_s \frac{A}{Q} = \frac{V_s}{\frac{Q}{A}} = \frac{V_s}{V_o}$$

Donde:

V_s = velocidad de sedimentación efectiva

V_o = velocidad de sedimentación teórica = Q/A

V_s/V_o = número de Hazen

El factor θ/t o el número de Hazen se determina por medio de la tabla de número de Hazen.

Con el fin de operar adecuadamente el desarenador, se hacen las siguientes recomendaciones:

1. $V_h < 20 V_s$
2. $9 < \frac{V_h}{V_o} < 15$
3. La velocidad horizontal debe ser menor que la velocidad de arrastre de las partículas, con el fin de evitar la resuspensión del sedimento.

$$V_h < V_r = \frac{\sqrt{8k}}{f} g(\rho_s - \rho)d$$

Para el caso de sedimentación de arenas, el valor de k es igual a 0,04, mientras que para sedimentación por la simple acción de la gravedad (no hay coagulación) el valor de f es igual a 0,03 (todos los demás términos quedan como se definieron en la ecuación de Stokes).

Tabla 4. Número de Hazen (V_s/V_o)

Condiciones	Remoción (%)							
	87.5	80	75	70	65	60	55	50
n=1	7,00	4,00	3,00	2,30	1,80	1,50	1,30	1,00
n=3	2,75		1,66					0,76
n=4	2,37		1,52					0,73
Máximo teórico	0,88		0,75					0,50

Fuente: López Cualla (2003).

1.2.2 NTC 1522 Ensayo para determinar la granulometría por tamizado

1.2.2.1 Objeto

Esta norma establece el procedimiento que se debe seguir en las operaciones de tamizado de suelos, con el fin de determinar su composición granulométrica.

1.2.2.2 Ensayos

- **APARATOS**

- **Balanzas**

Una con sensibilidad de 0,01 g para medir la masa del material que detiene el tamiz de 2,00 mm (No. 10) y otra con sensibilidad de 0,1% de la masa de la muestra, para medir la masa del material retenido en el tamiz 2,00 mm (No. 10).

- **Tamices:**

Deben cumplir con los requisitos establecidos en la NTC 32. Una serie completa incluye los siguientes tamices:

Tamiz de 76,1 mm (3 pulgadas)

Tamiz de 50,8 mm (2 pulgadas)

Tamiz de 25,4 mm (1 pulgada)

Tamiz de 19,0 mm (3/4 de pulgada)

Tamiz de 12,7 mm (1/2 de pulgada)

Tamiz de 9,51 mm (3/8 de pulgada)

Tamiz de 4,76 mm (No. 4)

Tamiz de 2,38 mm (No. 8)

Tamiz de 2,00 mm (No. 10)

Tamiz de 1,19 mm (No. 16)

Tamiz de 595 μm (No. 30)

Tamiz de 297 μm (No. 50)

Tamiz de 149 μm (No. 100)

Tamiz de 74 μm (No. 200)

- **Cuarteador de muestras (opcional)**

- **Un mortero de porcelana**

El extremo de la mano del mortero debe estar forrado en caucho.

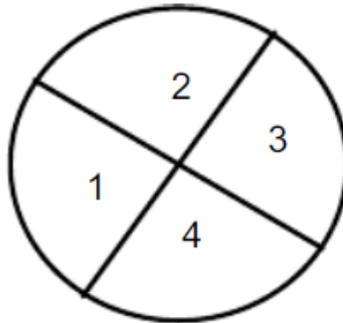
1.2.2.3 Procedimiento

La muestra se seca al aire y se divide en dos partes: una que contiene el material retenido en el tamiz de 2,00 mm (No. 10) y otra con el material que pasa.

- **Cuarteo**

La muestra se divide en cuatro partes aproximadamente iguales, manteniendo en ellas la composición original (ilustración 4). Se toman dos partes opuestas (1 y 3 o 2 y 4) y se repite el procedimiento hasta obtener la cantidad necesaria del material. Cuando se dispone del aparato de cuarteo, se pasa la muestra por dicho aparato.

Ilustración 4. Cuarteo de la muestra



Fuente: Norma técnica colombiana, NTC 1522, 1979, p. 2.

- **Tamaño de la muestra**

De acuerdo con el tamaño máximo del material y su contenido relativo de partículas gruesas y finas, se toma una cantidad de muestra total superior a la indicada en la siguiente tabla (tabla 5).

La cantidad de material retenido en el tamiz de 2,00 mm (No. 10) depende del tamaño máximo de las partículas.

Tabla 5. Masa de la muestra, de acuerdo con el tamaño nominal

Tamaño nominal máximo	Masa mínima aproximada, g
9,51 mm (3/8 de pulgada)	500
12,7 mm (1/2 de pulgada)	750
19,0 mm (3/4 de pulgada)	1000
25,4 mm (1 pulgada)	2000
38,0 mm (1 ½ pulgadas)	3000
50,8 mm (2 pulgadas)	4000
76,1 mm (3 pulgadas)	5000

Fuente: Norma técnica colombiana, NTC 1522, 1979, p. 2.

Si el suelo es arenoso, la cantidad de material que pasa el tamiz 2,00 mm (No. 10) será de unos 115 g, y si el suelo es limoso o arcilloso, será de 65 g.

- **Separación de la muestra por medio del tamiz de 2,00 mm (No. 10)**

Se mide la masa de la muestra y se pasa por el tamiz de 2,00 mm (No. 10). El material retenido se pasa al mortero de porcelana y sus partículas se disgregan para luego pasarlas de nuevo por el tamiz de 2,00 mm (No. 10). El material retenido en el segundo tamizado se lava sobre este tamiz, se seca y se mide su masa.

Se mezclan completamente los materiales que pasaron y por cuarteo se toman unos 115 g para suelos arenosos y unos 65 g para suelos limosos o arcillosos.

- **Tamizado del material retenido en el tamiz de 2,00 mm (No. 10)**

Se tamiza la parte retenida en el tamiz de 2,00 mm (No. 10), utilizando los tamices de 76,1 mm (3 pulgadas), 50,8 mm (2 pulgadas), 38,1 mm (1 1/2 de pulgada), 25,4 mm (1 pulgada), 19,0 mm (3/4 de pulgada), 12,7 mm (1/2 pulgada), 9,51 mm (3/8 de pulgada),

4,76 mm (No. 4) y 2,00 mm (No. 10) o los necesarios, de acuerdo con la naturaleza de la muestra o las especificaciones del material ensayado.

El tamizado se puede hacer manualmente o mediante el empleo de una máquina; sin embargo, en caso de duda se toma por válido el tamizado manual, en el que el material se mantiene en movimiento permanente, imprimiéndole al tamiz un movimiento circular con una mano mientras con la otra se golpea continuamente. La mano que sostiene el tamiz debe cambiar frecuentemente de posición con respecto a éste.

En ningún caso se debe facilitar con la mano el paso de partículas a través del tamiz. Después de un minuto se da por finalizada la operación con un tamiz, no más del 1% de la masa de la muestra.

Se mide la masa del material retenido en cada tamiz y se comprueba al final del tamizado que la suma no difiera en $\pm 2\%$ con respecto a la masa de la muestra utilizada.

- **Tamizado del material que pasa el tamiz de 2,00 mm (No. 10)**

Se miden con exactitud 100 g del material que pasa el tamiz de 2,00 (No. 10), si el suelo es arenoso, o 60 g si es arcilloso o limoso. Luego, se coloca en el vaso de precipitados y se añaden lentamente, al mismo tiempo que se agita, 125 cm³ de solución de exametafosfato sódico al 4 %. Se agita hasta humedecer completamente el suelo y se deja en reposo por lo menos durante 18 h. Se añade agua hasta 5 cm del borde del vaso y se agita la suspensión en el aparato agitador durante un minuto. Se lava todo el contenido sobre el tamiz de 74 μm (No. 200), hasta que pasa agua limpia. Posteriormente, el material retenido se coloca en una cápsula con ayuda de un chorro de agua y con cuidado de no perder partículas.

Por último, este material se seca en el horno a 110 °C y se pasa por los tamices de abertura menor que la del 2,00 mm (No. 10) y se mide la masa retenida en cada tamiz.

1.2.2.4 Cálculos y resultados

- Los cálculos y los resultados se efectúan sobre el formato que se sugiere a continuación: El factor por el cual se multiplican los porcentajes que pasan los tamices inferiores a 2,00 mm para convertirlos en porcentajes unificados se obtiene dividiendo por 100 el porcentaje que pasa el tamiz 2,00 mm (No. 10).

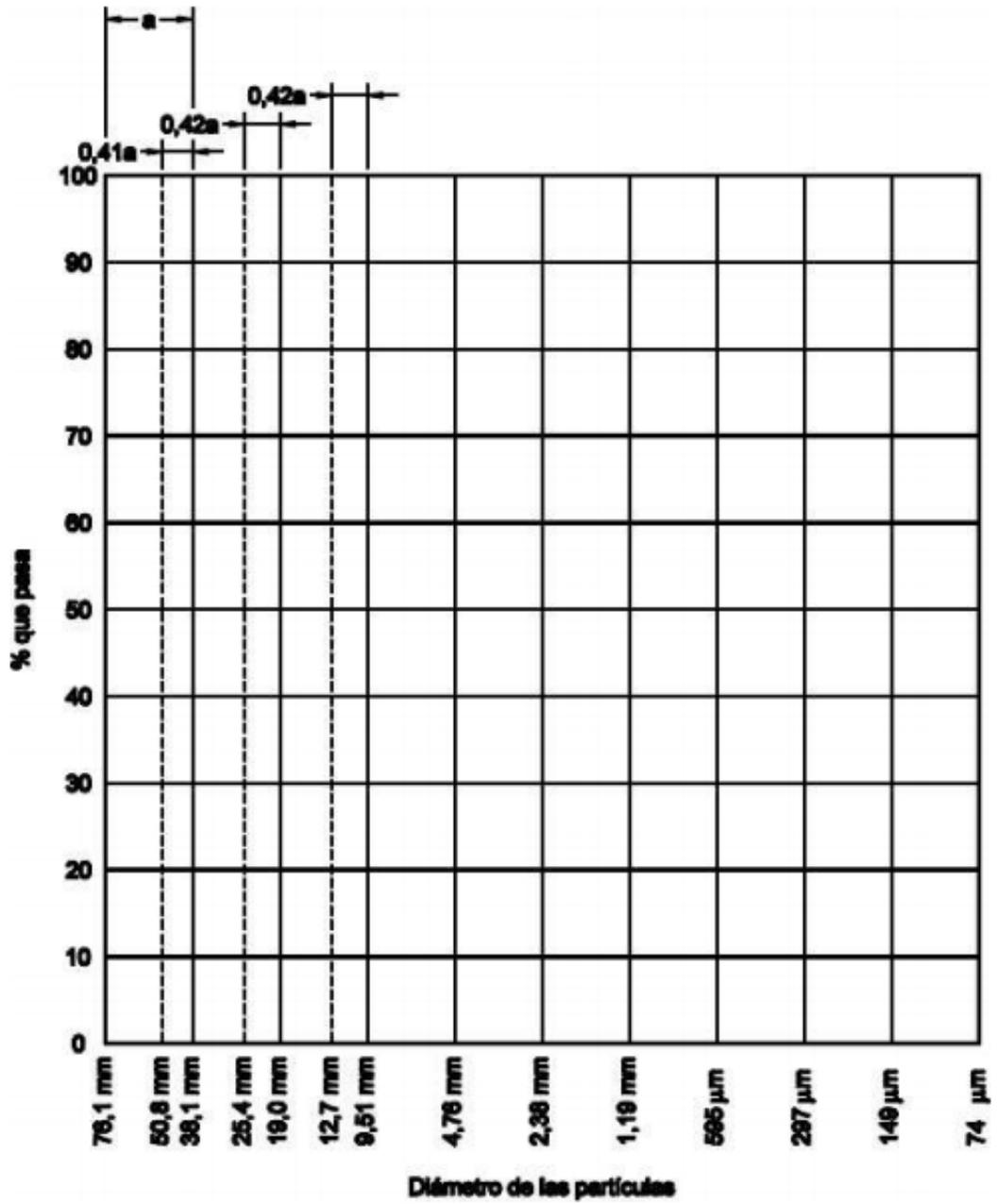
Tabla 6. Formato sugerido para el tamizado granulométrico

Tamiz Icontec	Masa retenida, g	%retenido	%pasa		% pasa unificado
76,1 mm (3 pulgadas)					
38,1mm (1 ½ pulgadas)					
25,4 mm (1 pulgada)					
19,0 mm (¾ de pulgada)					
12,7 mm (½ de pulgada)					
9,51 mm (3/8 de pulgada)					
4,76 mm (No. 4)				Factor 0	
2,38 mm (No. 8)					
2,00 mm (No. 200)					
1,19 mm (No. 16)					
595 µm (No. 30)					
297 µm (No. 50)					
149 µm (No. 100)					
74 µm (No. 200)					

Fuente: Norma técnica colombiana, NTC 1522, 1979, p. 4.

La curva granulométrica se dibuja en un gráfico como el que se presenta a continuación (ilustración 5).

Ilustración 5. Papel para curva granulométrica



Fuente: Norma técnica colombiana, NTC 1522, 1979, p. 5.

1.2.3 Instructivo de ensayo determinación de sólidos sedimentables SM2540F

1.2.3.1 *Objetivo*

Establecer la metodología para la determinación de sólidos sedimentables en la matriz agua con base en SM 2540F, de acuerdo con las condiciones del laboratorio o campo, según aplique.

1.2.3.2 *Alcance*

La determinación de sólidos sedimentables por el método SM 2540F volumétrico se realiza en muestras de agua superficiales, de acuerdo con lo establecido por el laboratorio. El límite inferior de lectura es de 0,1 mL/L.

1.2.3.3 *Definiciones*

SM: Estándar método.

Cono Imhoff: recipiente graduado en forma de cono que se utiliza para medir el volumen de sólidos sedimentables en muestras líquidas.

Sólidos: materia suspendida o disuelta en agua o aguas residuales.

1.2.3.4 *Aspectos de seguridad y salud en el trabajo*

Antes de iniciar el análisis se deben revisar el “Manual de higiene, salud ocupacional y seguridad en el laboratorio” y las hojas de seguridad.

En la preparación de los reactivos se deben utilizar los implementos de seguridad. En esta técnica son bata, pantalón, zapatos antideslizantes, gafas de seguridad y guantes de nitrilo.

Los residuos producto del análisis de la determinación se tratan de acuerdo con el documento “Disposición de muestras y residuos de análisis”.

1.2.3.5 *Equipo, reactivos y materiales*

- **Equipos**
N/A
- **Reactivos**
N/A
- **Materiales**

Cono Imhoff

Soporte en madera del cono Imhoff

Agitador de vidrio

Cronómetro

1.2.3.6 Limitaciones e interferencias

Cuando haya presencia de floc biológico o químico se recomienda emplear el método gravimétrico.

1.2.3.7 Control y aseguramiento de calidad

Las prácticas de control de calidad se consideran parte integral de cada método. Para este método se incluye la siguiente tabla (tabla 7).

Tabla 7. Control de calidad método 2540 f.

Calibración o estandarización	Muestra control (QCS)	Blanco de método (MB)	Blanco fortificado en laboratorio (LFB)	Duplicado	Blanco fortificado en laboratorio (LFB)
-	-	-	-	x	-

Tomado del SM Tabla 2020: II. (- indica que un tipo de control de calidad no es obligatorio para el método).

- Se debe efectuar el análisis en el tiempo estipulado, asegurando la confiabilidad del resultado.
- Para el análisis de sólidos sedimentables se requiere el duplicado de muestras, de acuerdo con el SM 2540F, y se registra el dato en la carta de control de duplicados.

1.2.3.8 Desarrollo

- **Principio del método**

Los sólidos asentables en aguas superficiales y salinas, así como en desechos domésticos e industriales, pueden determinarse e informarse sobre un volumen (mL / L) o un peso (mg / L). Los sólidos sedimentables son aquellos que tienen un tamaño de 10 μ , se desprenden de

la suspensión en un tiempo determinado y están constituidos por partículas más densas que el agua.

- **Toma y preservación de muestras**

Las muestras se pueden tomar en recipientes plásticos o de vidrio. Se deben analizar sin ningún tipo de pretratamiento o preservación. Para el análisis con su duplicado se requieren, como mínimo, 2000 mL de muestra.

- **Limpieza de vidriería y material de campo**

Remítase al instructivo “Lavado material de vidrio”. Se debe utilizar vidriería a la que se le haya efectuado control de calidad.

- **Ejecución de la técnica**

Volumétrico:

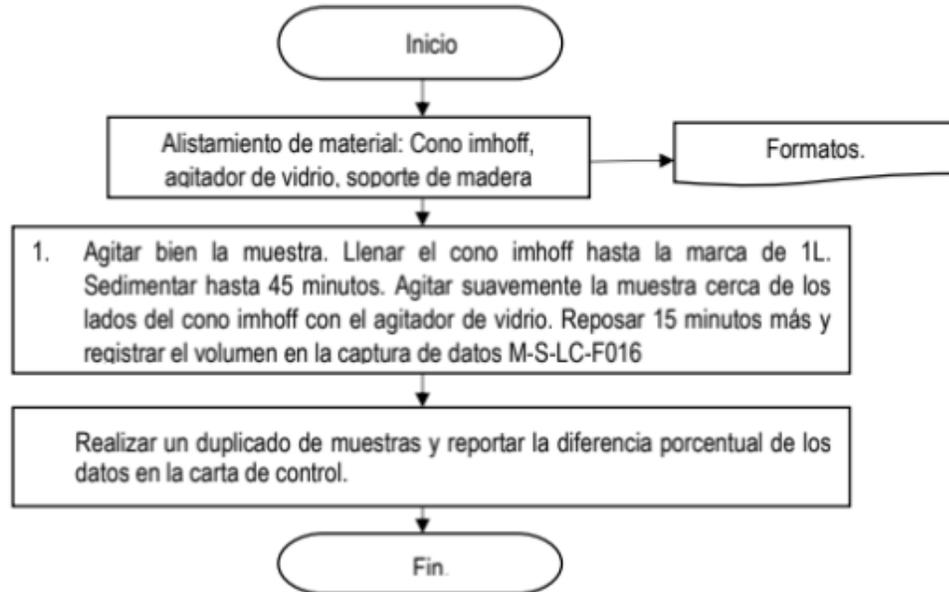
1. Agitar bien la muestra.
2. Llenar el cono Imhoff hasta la marca de 1 L.
3. Sedimentar durante 45 minutos.
4. Transcurrido este tiempo, agitar suavemente la muestra cerca de los lados del cono con el agitador de vidrio.
5. Dejar reposar por 15 minutos más.
6. Registrar el volumen de sólidos sedimentables en el formato M-S-LC-F016.
7. Realizar un duplicado de muestras y registrar la diferencia porcentual en la carta de control.

- **Cálculos y resultados**

La medición de los sólidos sedimentables es directa; por tanto, se registra el valor en la captura de datos M-S-LC-F016, con dos cifras significativas.

1.2.3.9 Diagrama

Ilustración 6. Diagrama del procedimiento de ensayo de sedimentación



Fuente: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2017, p. 4.

1.3 Marco legal

Para el desarrollo de este trabajo de investigación práctico se consultaron los siguientes documentos:

- Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico, expedido mediante Resolución N° 1096 del 17 noviembre del 2000.
- Reglamento Técnico del Sector de Agua potable y Saneamiento Básico, expedido mediante Resolución N° 0330 del 8 junio del 2017.
- NTC 1522 Ensayo para determinar la granulometría por tamizado.
- Ideam, “Instructivo de ensayo. determinación de sólidos sedimentables. sm 2540 f”.

2. Diseño

2.1 Diseño del desarenador

El desarenador se diseñó con base en la metodología expuesta en el libro *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados*, López Cualla (2003), y las indicaciones del ingeniero Héctor Matamoros Rodríguez en la clase de Acueductos y alcantarillados.

2.1.1 Condiciones de diseño del desarenador

A continuación se presentan los datos iniciales para el diseño:

- Caudal de diseño = 0,00025 (m³/s) o 0,25 (l/s)
- Diámetro de las partículas que se deben remover = 0,05 (mm)
- Temperatura = 15 °C
- Viscosidad cinemática = 0,000001146 (m²/s)
- Densidad del agua = 999,1 (kg/ m³)
- Relación largo/ancho = 3 : 1
- Nivel sobre el nivel del mar = 2555,6 (msnm)
- Densidad relativa de sedimentos = 1,7
- Velocidad de sedimentación aproximada = 0,10 (cm/s)
- Gravedad = 9,806 (m/s²) o 980,6 (cm/s²)
- Porcentaje de remoción = 90%
- Número de Reynolds:

$$Re = \frac{Vs. \text{ aprox} * d}{\nu} = \frac{\frac{0,1}{100} * \frac{0,05}{1000}}{0,000001146} = 0,043630$$

- Velocidad de sedimentación:

$$V_s = \frac{g}{18} * \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} * d^2 = \frac{9,806}{18} * \frac{(1,7 - 0,9991)}{0,000001146} * \left(\frac{0,05}{1000}\right)^2 \\ = 0,000832973(\text{m/s}) \text{ o } 0,0832973(\text{cm/s})$$

La velocidad aproximada debe ser igual o similar a la teórica.

Se asume la altura del desarenador = H = 0,70 metros.

- Tiempo de sedimentación:

$$t_s = \frac{H}{V_s} = \frac{0,70}{0,000832973} = 840,36 \text{ s}$$

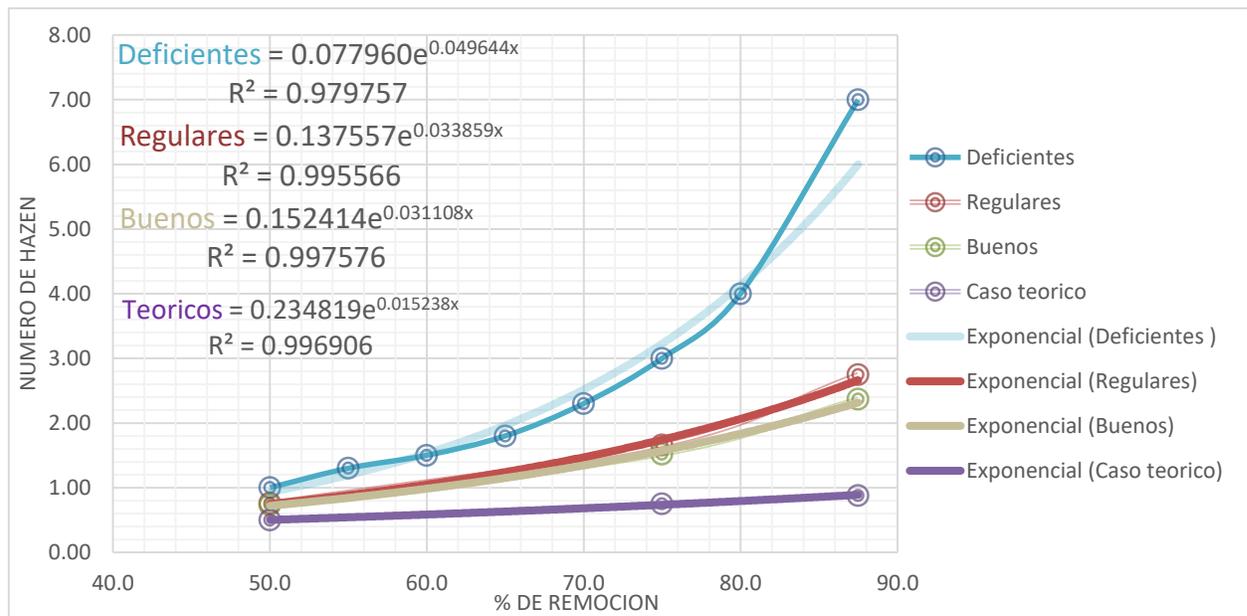
Se calculó la ecuación de la gráfica para cada tipo de deflectores, de acuerdo con los valores expuestos por Hazen (tabla 8).

Tabla 8. Número de Hazen

Tipo deflector	% remoción							
	87,5	80	75	70	65	60	55	50
Deficientes	7,00	4,00	3,00	2,30	1,80	1,50	1,30	1,00
Regulares	2,75		1,66					0,76
Buenos	2,37		1,52					0,73
Caso teórico	0,88		0,75					0,50

Fuente: López Cualla (2003).

Ilustración 7. Coeficiente de Hazen



Fuente: elaboración propia.

Para los deflectores deficientes la ecuación es:

$$Deficientes = 0,077960e^{0,049644x}$$

$$R^2 = 0,979757$$

Para los deflectores regulares la ecuación es:

$$Regulares = 0,137557e^{0,033859x}$$

$$R^2 = 0,995566$$

Para los deflectores buenos la ecuación es:

$$Buenos = 0,152414e^{0,031108x}$$

$$R^2 = 0,997576$$

Para los deflectores caso teórico la ecuación es:

$$Caso\ teórico = 0,234819e^{0,015238x}$$

$$R^2 = 0,996906$$

- Se calculó el número de Hazen para un porcentaje de remoción de 90% (deflectores buenos):

$$\text{Número de Hazen } 90\% = 0,152414e^{0,031108 \cdot 90} = 2,51$$

- Tiempo de retención hidráulica:

$$\begin{aligned} t_{rh} &= t_s * \text{Número de Hazen} = 840,36 * 2,51 = 2109,30 \text{ s} = 35,155 \text{ minutos} \\ &= 0,5859 \text{ horas} \end{aligned}$$

Nota: el tiempo de retención hidráulica debe estar entre 0,5 y 4 horas.

2.1.2 Dimensiones del diseño

- Volumen:

$$Volumen = t_{rh} * Qd * 3600 = 0,5859 * 0,00025 * 3600 = 0,52731 \text{ m}^3$$

- Área superficial:

$$A_s = \frac{Volumen}{H} = \frac{0,52731}{0,7} = 0,7533 \text{ m}^2$$

- Ancho:

$$B = \sqrt{\frac{A_s}{\text{Relación largo/ancho}}} = \sqrt{\frac{0,7533}{3}} = 0,5011 \text{ m}$$

- Longitud o largo:

$$L = B * \text{Relación} \frac{\text{largo}}{\text{ancho}} = 0,5011 * 3 = 1,5033 \text{ m}$$

- Caudal unitario:

$$qi = \frac{Qd * 86400}{A_s} = \frac{0,00025 * 86400}{0,7533} = 28,6738 \text{ (m}^3\text{/m}^2\text{/día)}$$

Nota: el caudal unitario debe encontrarse entre 15 horas y 80 (m³/m²/día).

- Velocidad media horizontal:

$$V_x = \frac{\frac{Qd}{B}}{H} = \frac{\frac{0,00025}{0,5011}}{0,70} = 0,0007127 \text{ (m/s)}$$

Nota: según la RAS, la velocidad máxima es de 0,25 (m/s).

Se debe verificar que V_x sea menor a $20 * V_s$:

$$20 * V_s = 0,000832973 * 20 = 0,0166595 \text{ (m/s)}$$

$$20 * V_s > V_x = 0,0166595 > 0,0007127$$

- Coeficiente de fricción de la partícula:

$$f = \left(2,5 * \log \frac{3,71}{\frac{d}{H}} \right)^{-2} = \left(2,5 * \log \frac{3,71}{\frac{0,05/1000}{0,7}} \right)^{-2} = 0,007195552$$

- Velocidad de arrastre V^* :

$$V^* = V_x * \sqrt{\frac{f}{8}} = 0,0007127 * \sqrt{\frac{0,007195552}{8}} = 0,000021374395 \text{ (m/s)}$$

- Esfuerzo tractivo:

$$\tau_0 = V^{*2} * \rho = 0,000021374395^2 * 999,1 = 0,000000456$$

- Número de Reynolds de corte Re^* :

$$Re^* = \frac{V^* * d}{\nu} = \frac{0,000021374395 * \frac{0,05}{100}}{0,000001146} = 0,000933$$

- Se asume un esfuerzo tractivo $\tau = 0,1$

- Velocidad de arrastre:

$$V_a = \sqrt{\frac{\tau * 8 * g * (\rho_s - \rho) * d}{f}} = \sqrt{\frac{0,1 * 8 * 9,806 * (1,7 - 0,9991) * \frac{0,05}{1000}}{0,007195552}} = V_a$$

$$= 0,195466307(\text{m/s})$$

- Pérdidas por arrastre h_f

$$h_f = \frac{f * \frac{L}{H} * V_x * 2}{2 * g} = \frac{0,007195552 * \frac{1,5}{0,7} * 0,000712707 * 2}{2 * 9,806} = 0,0000011 \text{ m}$$

Nota: la velocidad horizontal debe ser menor a la velocidad de arrastre.

$$V_x < V_a = 0,0007127(\text{m/s}) < 0,195466307(\text{m/s})$$

- Verificación de condiciones al inicio de operación:

$$Q_v = 0,00015 \text{ (m}^3/\text{s)} \text{ o } 0,15 \text{ (l/s)}$$

- Tiempo de retención hidráulica de verificación al inicio de operación:

$$t_{rhv} = \frac{\text{Volumen}}{Q_v} / 3600 = \frac{0,527328125}{0,00015} / 3600 = 0,9765 \text{ Hr}$$

- Caudal unitario al inicio de operación, qi^* :

$$qi^* = \frac{Q * 86400}{A_s} = \frac{0,00015 * 86400}{0,7533} = 17,20(\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día})$$

Nota: se realiza nuevamente la validación del tiempo de retención y el caudal unitario para el periodo de inicio de operación.

El tiempo de retención hidráulica debe encontrarse entre 0,5 y 4 horas.

El caudal unitario debe estar entre 15 horas y 80 ($\text{m}^3/\text{m}^2/\text{día}$).

2.1.3 Vertedero de salida

$$Qd = 0,00025 \text{ (m}^3\text{/s) o } 0,25 \text{ (l/s)}$$

- Altura sobre el vertedero tomando la fórmula de Francis (H^*)

$$H^* = \left(\frac{Qd}{1,84 * B} \right)^{\frac{2}{3}} = \left(\frac{0,00025}{1,84 * 0,5} \right)^{\frac{2}{3}} = 0,00419 \text{ m}$$

- Velocidad en el vertedero de salida V^{**} .

$$V^{**} = \frac{Qd}{B * H^*} = \frac{0,00025}{0,5 * 0,00419} = 0,11909 \text{ (m/s)}$$

- Ecuación de alcance horizontal X_s .

$$X_s = 0,36 * (V^{**})^{\frac{2}{3}} + 0,60 * (H^*)^{\frac{4}{7}} = 0,36 * (0,11909)^{\frac{2}{3}} + 0,60 * (0,00419)^{\frac{4}{7}} \\ = 0,1134\text{m}$$

- Altura de velocidad h_v :

$$h_v = \frac{V^{**2}}{2 * g} = \frac{0,11909^2}{2 * 9,806} = 0,000723 \text{ m}$$

Nota: se valida $h_v / H^* < 0,2$

$$\frac{h_v}{H^*} = \frac{0,000723}{0,00419} = 0,1725$$

Nota: se valida el número de Froude < 1

$$\frac{V^{**}}{\sqrt{9,806 * H^*}} = \frac{0,11909}{\sqrt{9,806 * 0,00419}} = 0,5875$$

Para facilitar el mantenimiento y la operación se asume la longitud del verdadero de 0,4 metros.

2.1.4 Diseño de la zona de entrada

- Ancho en la zona de entrada $B/3$ o $B/2$

$$B_{\text{entrada}} = \frac{B}{2} = \frac{0,5011}{2} = 0,250 \text{ m}$$

- Altura de cámara de llegada H/2:

$$A_{cámara} = \frac{H}{2} = \frac{0,70}{2} = 0,35m$$

- Longitud de la cámara de llegada Lc: asumida 0,70 metros

2.1.5 Pantalla deflectora y orificios

- Velocidad en los orificios V_{ori} asumida: 0,1 (m/s), que es la velocidad máxima permitida por el RAS.

- Número de orificios asumidos $N_{ori} = 20$, con separaciones cada 5 cm.

- Caudal para cada orificio q_{ori} :

$$q_{ori} = \frac{Qd}{N_{ori}} = \frac{0,00025}{20} = 0,0000125(m^3/s)$$

- Área de cada orificio q_{ori} :

$$A_{ori} = \frac{Qd}{V_{ori}} = \frac{0,0000125}{0,1} = 0,000125(m^2)$$

- Diámetro del orificio D_{ori} :

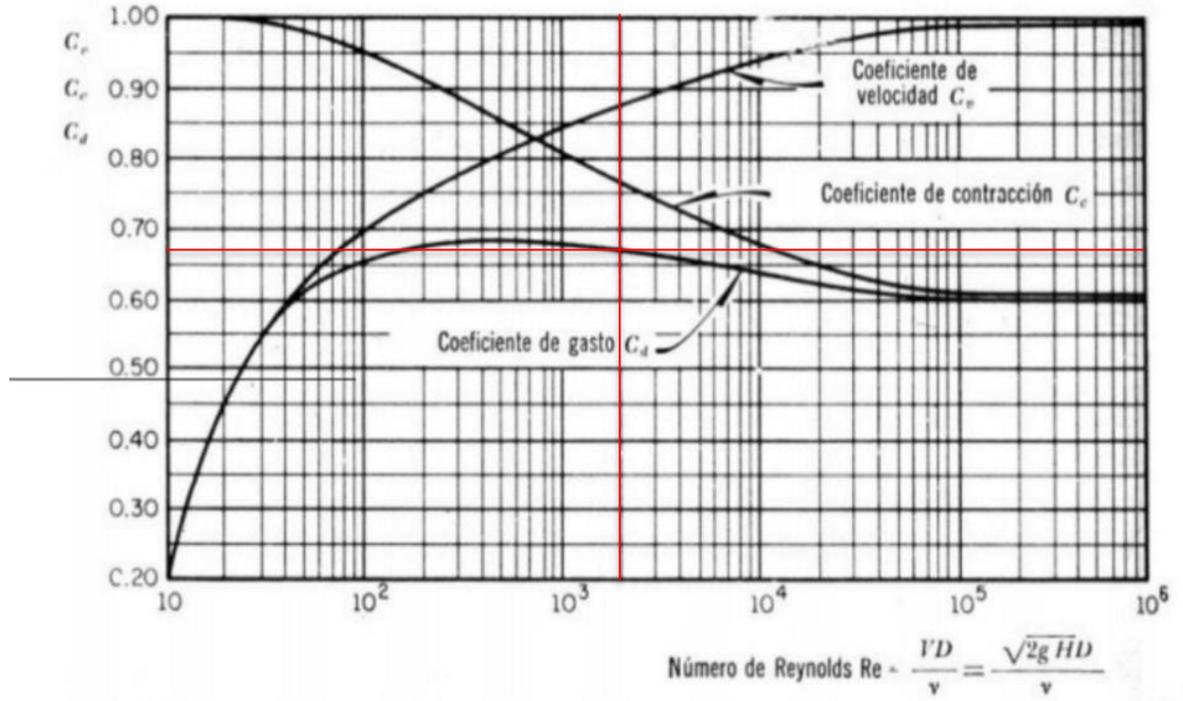
$$D_{ori} = \sqrt{\frac{A_{ori} * 4}{\pi}} = \sqrt{\frac{0,000125 * 4}{3,1416}} = 0,01261(m)$$

- Número de Reynolds del orificio Re_{ori} :

$$Re_{ori} = \frac{V_{ori} * D_{ori}}{\nu} = \frac{0,1 * 0,01261}{0,000001146} = 1100,349$$

- Coeficiente de velocidad:

Ilustración 8. Variación de los coeficientes de descarga (C_d), velocidad (C_v) y contracción (C_c) con el número de Reynolds en un orificio circular.



Fuente: Sotelo, G. (1982).

Coeficientes de descarga C_d asumido 0,67

- Pérdida de energía hf_{ori} :

$$hf_{ori} = \frac{1}{C_d^2} - 1 * \frac{V_{ori}^2}{2 * g} = \frac{1}{0,67^2} - 1 * \frac{0,1^2}{2 * 9,806} = 0,000625 \text{ m}$$

2.1.6 Tolva de lodos

- Concentración de lodos: $C_{lodo}=100$ (mg/l)
- Tiempo entre lavados: 1 (semana)
- Volumen de sedimentos Vol_{Sed} :

$$Vol_{Sed} = \frac{C_{lodo} * Semanas * días * 86400 * Qd}{\rho_s * 1000000}$$

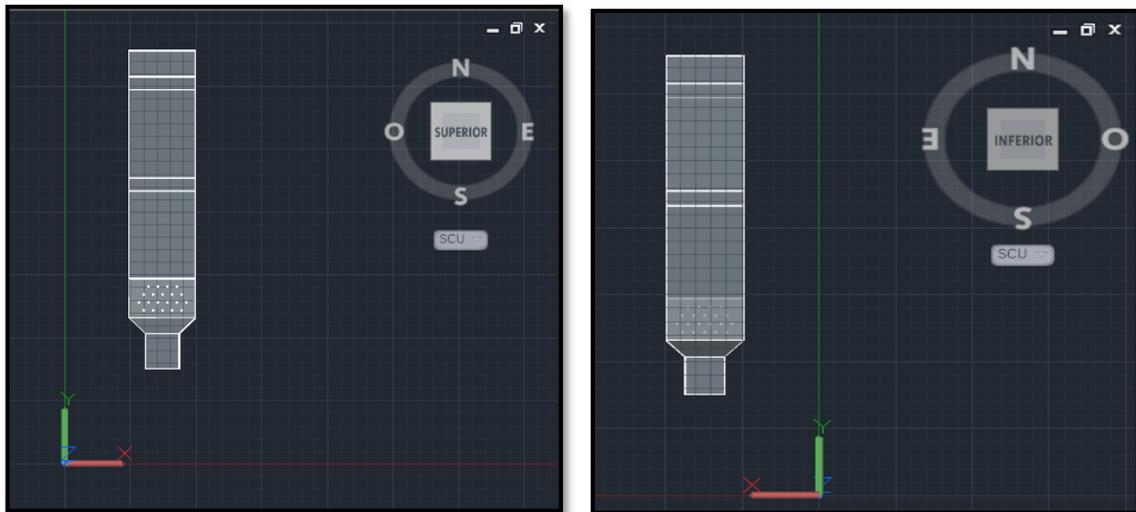
$$= \frac{100 * 1 * 7 * 86400 * 0,00025}{1,7 * 1000000} = 0,00889(m^3)$$

2.2 Construcción del modelo desarenador en CAD 3D

El modelo de desarenador se construyó en CAD 3D con las especificaciones de la lámina de acrílico de 5 mm y los datos de sus dimensiones expuestos en el capítulo anterior. Se realizaron los planos de corte y el ensamblaje.

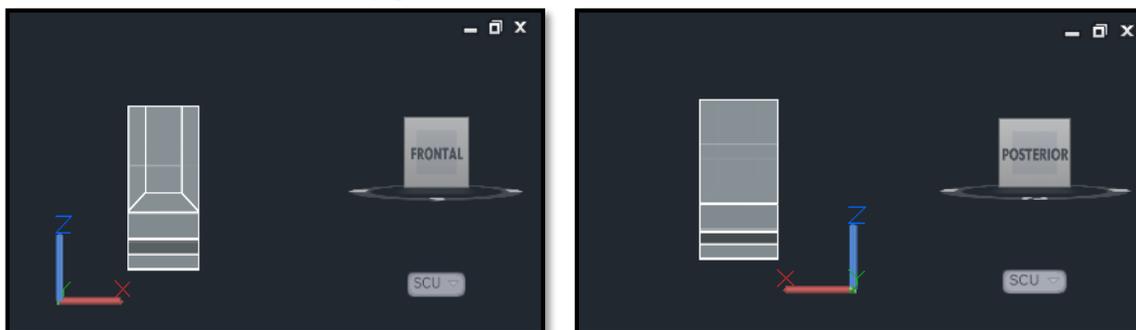
A continuación se presenta el modelo en 3D con sus diferentes vistas (ilustraciones 9 a 17).

Ilustración 9. Vistas superior e inferior del modelo en 3D



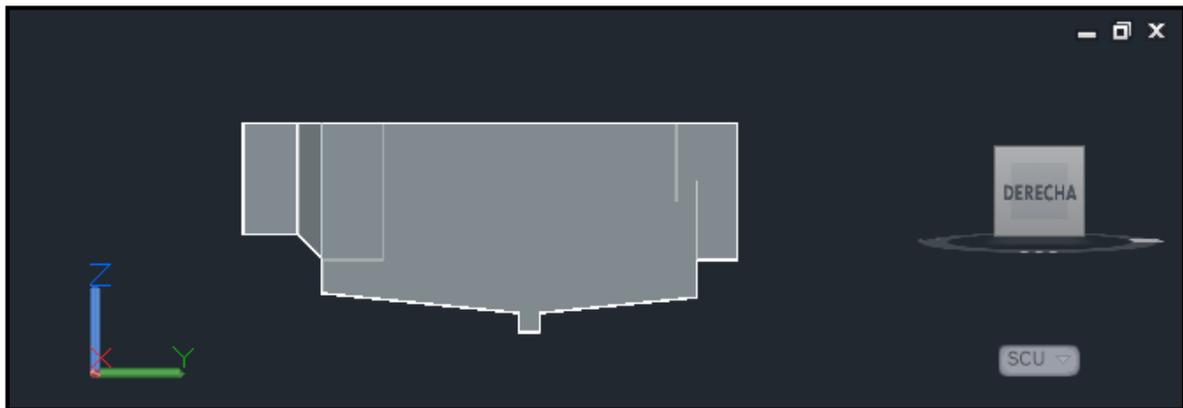
Fuente: elaboración propia.

Ilustración 10. Vistas frontal y posterior del modelo en 3D



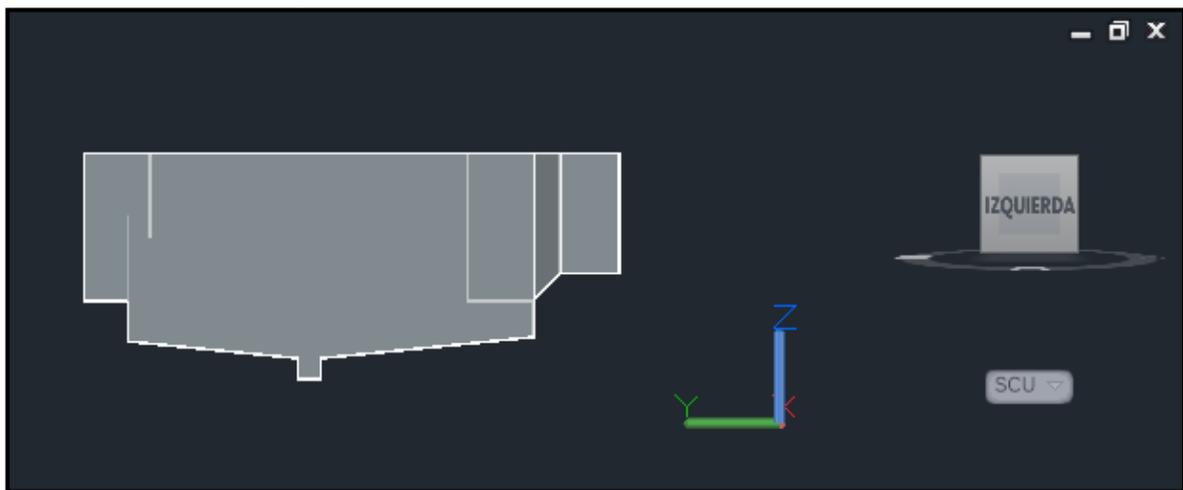
Fuente: elaboración propia.

Ilustración 11. Vista derecha del modelo en 3D



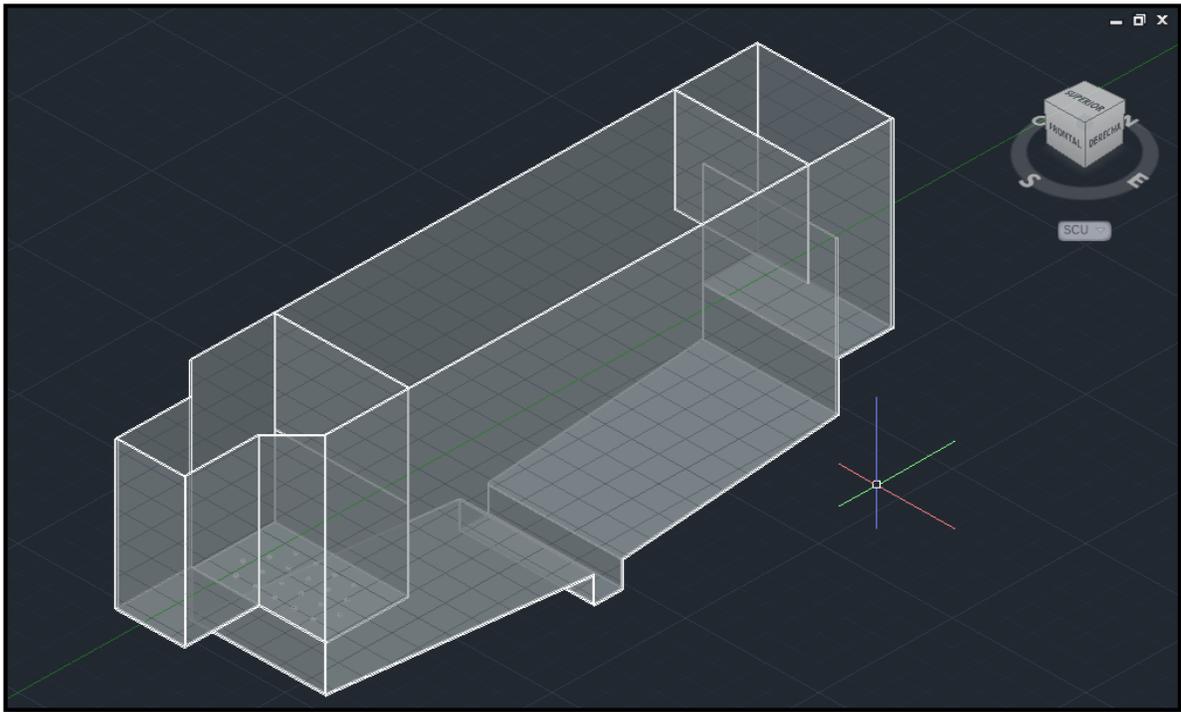
Fuente: elaboración propia.

Ilustración 12. Vista izquierda del modelo en 3D



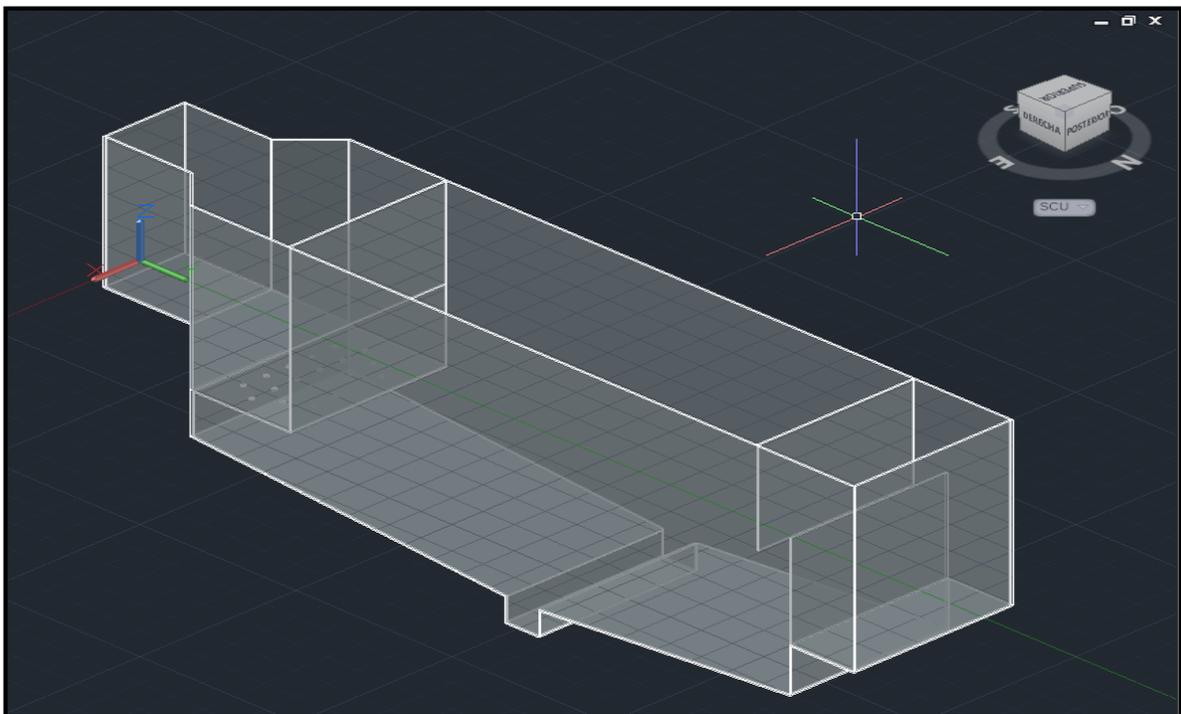
Fuente: elaboración propia.

Ilustración 13. Vista superior - frontal - derecha en 3D



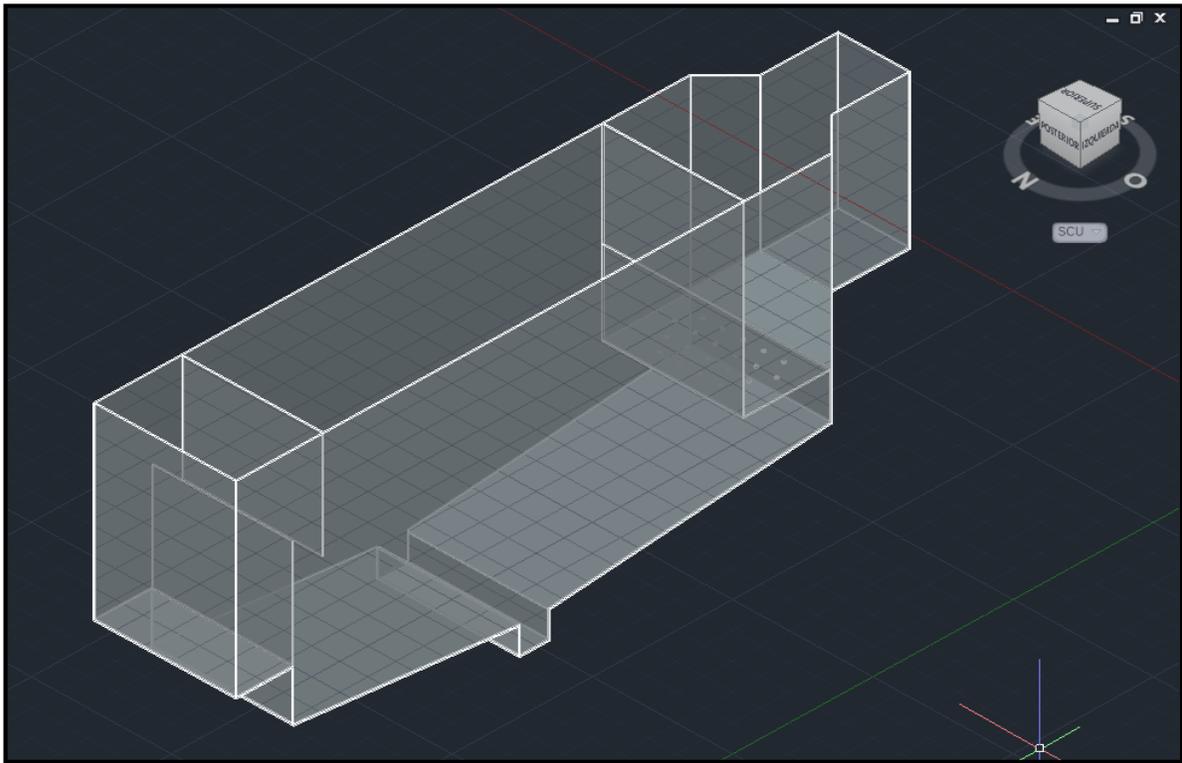
Fuente: elaboración propia.

Ilustración 14. Vista superior - posterior - derecha en 3D



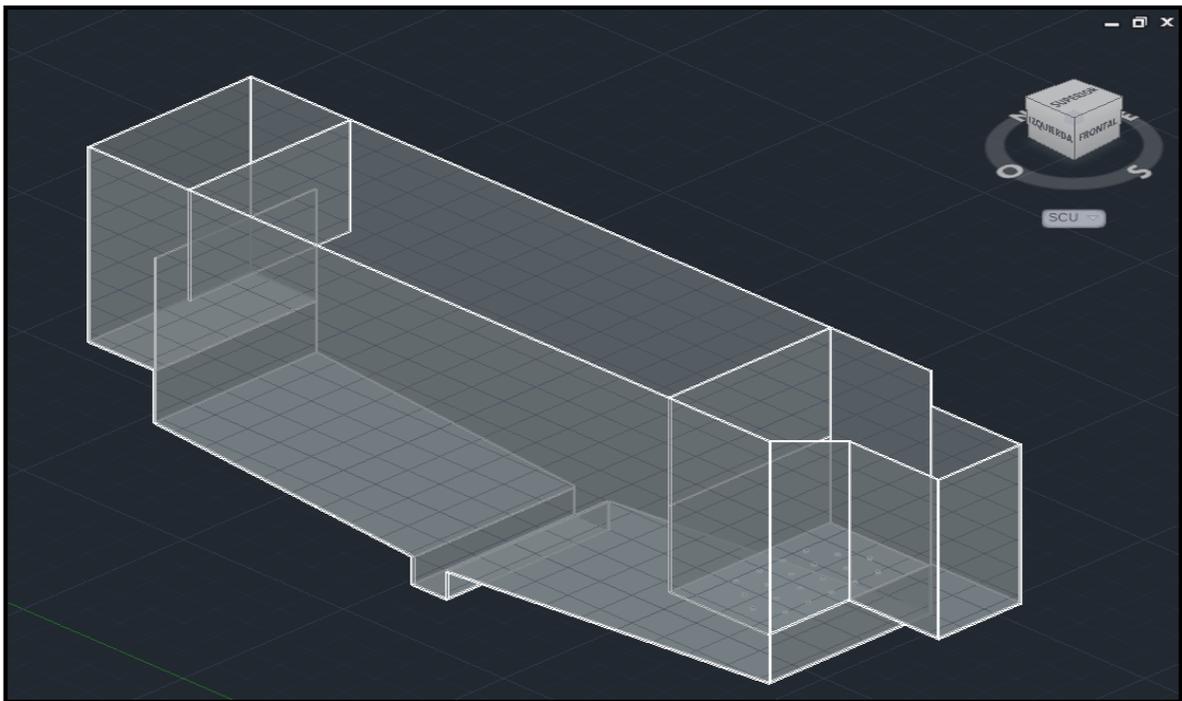
Fuente: elaboración propia.

Ilustración 15. Vista superior - posterior- izquierda en 3D



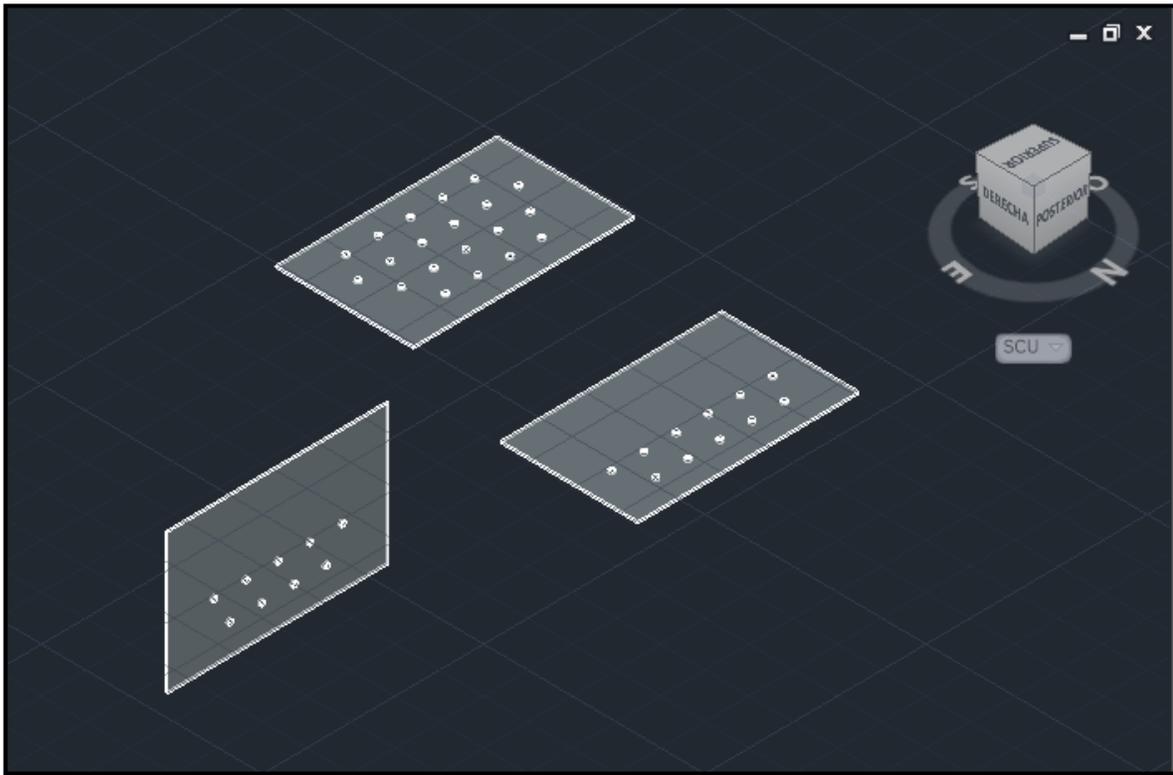
Fuente: elaboración propia.

Ilustración 16. Vista superior - frontal - izquierda en 3D



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 17. Tres tipos de pantallas deflectoras en 3D



Fuente: elaboración propia.

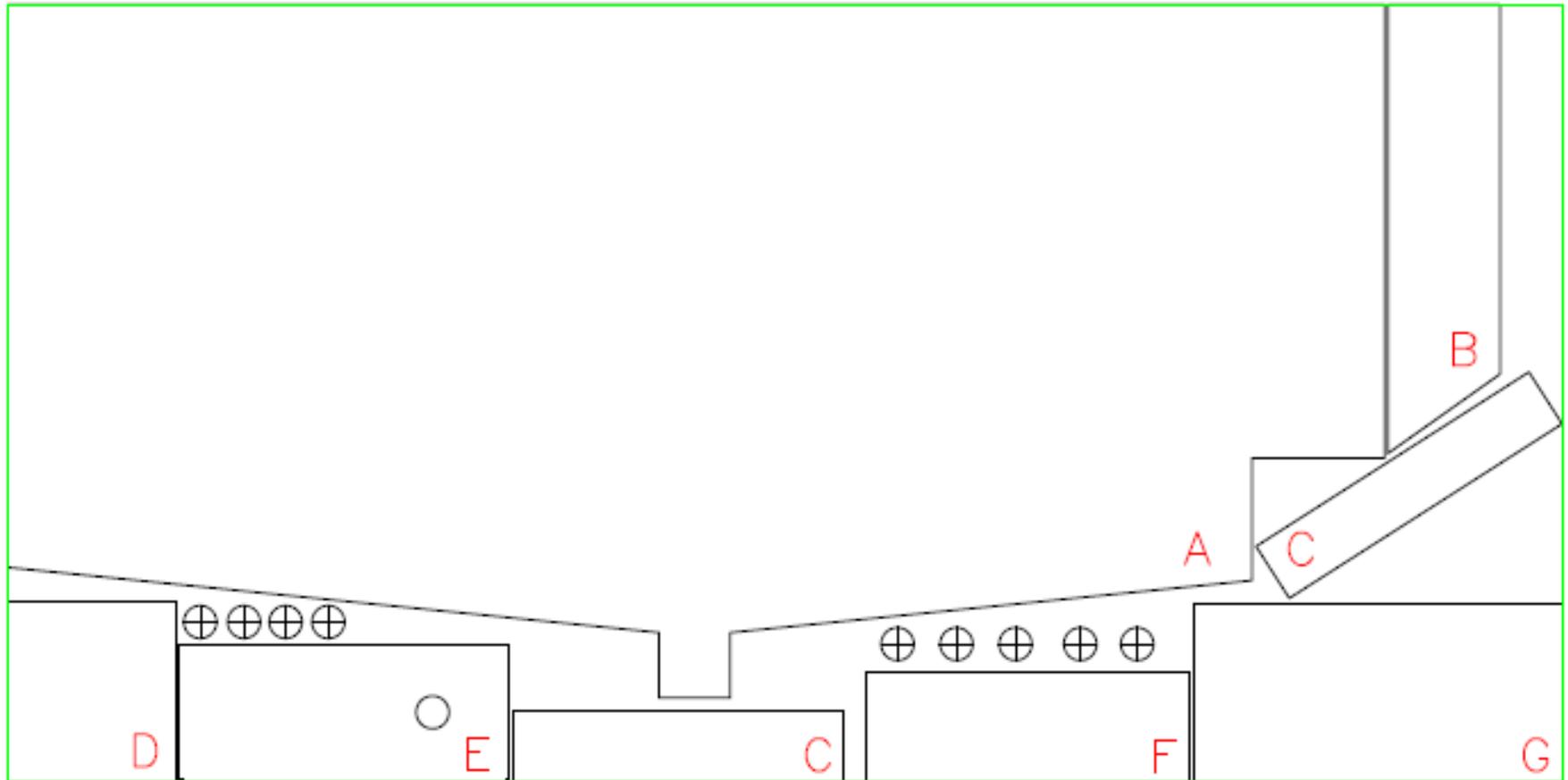
2.3 Despiece del modelo 3D

Una vez realizado el modelo en 3D del desarenador se hizo su despiece para construir el plano y, posteriormente, cortar el acrílico de 5 mm con las dimensiones requeridas para su ensamblaje.

Se encajaron las piezas en la lámina de acrílico de 5 mm, que mide 2,40 x 1,2 m. A continuación se presentan los planos de corte para la construcción del modelo en acrílico (ilustraciones 18 a 20).

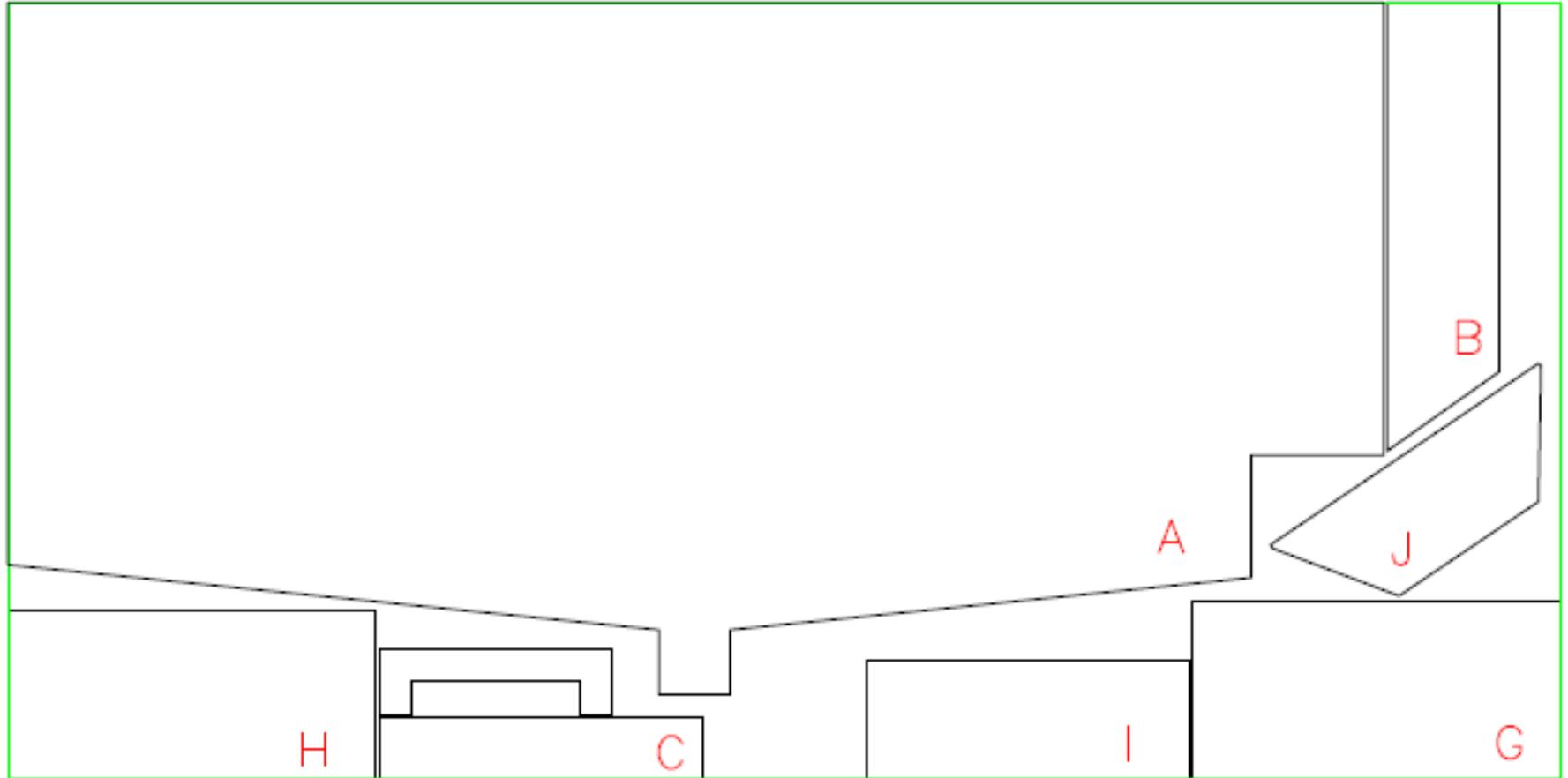
El borde verde representa las dimensiones de la lámina de acrílico (2,40 x 1,2 m). El borde negro muestra las dimensiones de corte de la pieza. Las letras en color rojo identifican las piezas para el ensamblaje.

Ilustración 18. Lámina 1 (2,4 x 1,2 m)



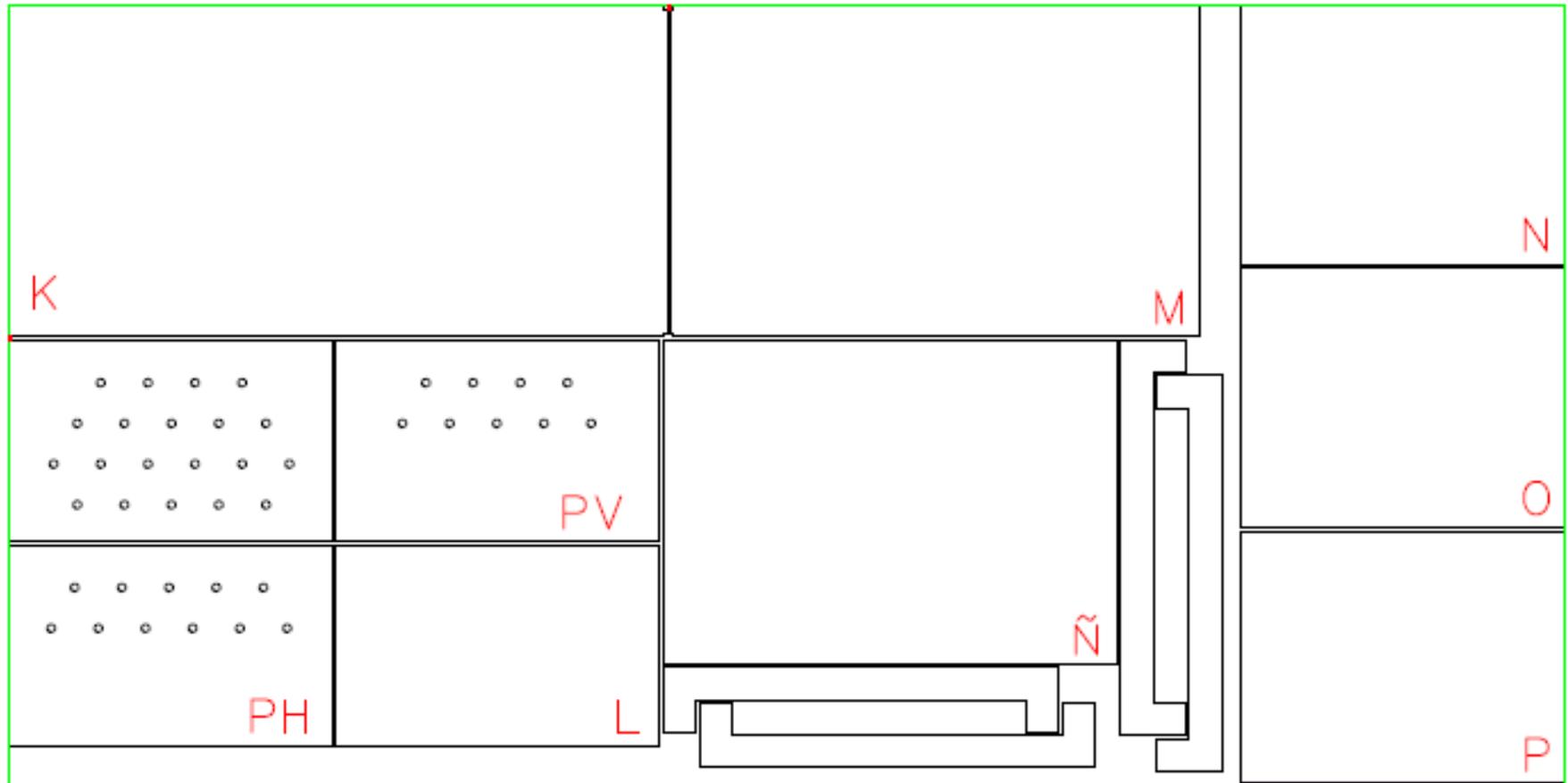
Fuente: elaboración propia.

Ilustración 19. Lámina 2 (2,4 x 1,2 m)



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 20. Lámina 3 (2,4 x 1,2 m)



Fuente: elaboración propia.

2.4 Ensamblaje del modelo del desarenador en acrílico

Después de cortar las láminas de acrílico se ensamblaron y pegaron las piezas.

Ilustración 21. Transporte del material en acrílico



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 22. Pieza más grande (2,13 x 1,07 m)



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 23. Piezas medianas



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 24. Piezas pequeñas



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 25. Pegado de la cámara de entrada



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 26. Ensamblaje del modelo en acrílico



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 27. Modelo en acrílico



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 28. Modelo en acrílico con los pegues reforzados



Fuente: elaboración propia.

2.5 Construcción de la estructura metálica

Para evaluar el modelo hidráulico de un desarenador es necesario construir una estructura metálica que soporte el empuje que ejerce el agua sobre las láminas de acrílico.

Ilustración 29. Ubicación de la parte inferior de la estructura metálica



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 30. Parte inferior de la estructura metálica



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 31. Tornillos niveladores de la estructura metálica



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 32. Construcción de los ángulos de cierre de la estructura metálica



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 33. Templetes para atornillar la estructura en la parte superior



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 34. Paralelos metálicos para el empuje lateral



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 35. Limpieza y lijado de los residuos de soldadura



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 36. Modelo en acrílico y estructura metálica pintada



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 37. Vistas frontal y posterior del modelo



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 38. Transporte del modelo hidráulico hacia la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito



Fuente: elaboración propia.

2.6 Pruebas de retención del fluido en el acrílico

Para verificar que no se presenten fugas en los vértices y poder realizar las pruebas de laboratorio es necesario realizar de retención del fluido en el modelo en acrílico.

Ilustración 39. Modelo lleno al 50%



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 40. Modelo lleno al 75%



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 41. Modelo lleno al 100%



Fuente: elaboración propia.

2.7 Materiales para el montaje hidráulico del modelo

A continuación se describen los materiales necesarios para el montaje hidráulico del modelo en acrílico de un desarenador.

2.7.1 Tanques de almacenamiento de 250 litros

Se requiere la instalación de dos tanques de 250 litros, tipo de tanque bajito.

Ilustración 42. Tanque bajito de 250 litros



Fuente: Colempaques.

2.7.2 Bomba hidráulica con capacidad de paso de sedimentos

Se requiere una bomba con capacidad de paso de sedimentos y el caudal requerido. Para este estudio se seleccionó la siguiente:

Equipo de riego portátil 1,8 Hp AC1AG41, marca Evans.

Ilustración 43. Equipo de riego portátil 1,8 Hp AC1AG41, marca Evans



Fuente: Evans Colombia.

Ilustración 44. Especificaciones técnicas del equipo de riego portátil 1,8 Hp AC1AG41, marca Evans

MOTOR	—
Tipo de Motor:	Gasolina
Tiempos del Motor	2
Marca del motor:	Thunder®
Potencia del Motor:	1.80 HP
Desplazamiento:	41
RPM del Motor:	7000 RPM
Encendido:	Manual con Retráctil
Capacidad del Tanque de Combustible:	0.95 lts
Aceite Recomendado:	Aceite para motor 2 tiempos
Mezcla de Aceite:	25:1
BOMBA	-
Tipo de Bomba:	Equipo de Riego
Flujo Optimo:	82.00 LPM
Altura Optima:	21.00 m
Diametro de succion:	1.00 pulg
Diametro de descarga:	1.00 pulg
Tipo de impulsor:	Semi-abierto
Material del cuerpo:	Aluminio
Material del impulsor:	Aluminio
Material del sello mecanico:	Cerámica, Acero inoxidable, Carbón, Buna
Temperatura Maxima del Agua:	40 C
INFORMACION ADICIONAL	-
Garantia:	6 meses
Dimensiones de Empaque:	40.00 X 33.00 X 39.00 cm
Peso:	6.70 kg

Fuente: Evans Colombia.

2.7.3 Tuberías o mangueras

Se requirieron 20 metros de tubería o manguera transparente trenzada en PVC de una pulgada.

Ilustración 45. Manguera transparente trenzada en PVC de una pulgada



Fuente: Evans Colombia.

2.7.4 Motor de 110 V de ½ HP

Se requirió comprar un motor para el movimiento de los sedimentos en el tanque inicial, con el propósito de que no se sedimenten en el fondo.

Ilustración 46. Motor de 110 V de ½ HP



Fuente: elaboración propia.

2.7.1 Aspas para la mezcla

Se instaló un motor con aspas para el movimiento continuo de los sedimentos en el estanque inicial.

Ilustración 47. Aspas para equiparlas en el motor



Fuente: elaboración propia.

2.7.1 Válvulas

Se instalaron cinco válvulas de bola en el sistema.

Ilustración 48. Válvulas de bola



Fuente: elaboración propia.

- 1) Aspas de mezcla de sedimento.
 - 2) Motor 110v ½ Hp.
 - 3) Tanque inicial de 250 litros.
 - 4) Manguera PVC 1" succión.
 - 5) Motobomba agrícola.
 - 6) Manguera PVC 1" impulsión.
 - 7) Tanque elevado de 250 litros.
 - 8) Manguera PVC 1" alimentación. Tanque elevado de 250 litros hacia la cámara de entrada del modelo del desarenador en acrílico.
 - 9) Pantallas deflectoras.
 - 10) Modelo de desarenador en acrílico.
 - 11) Manguera PVC 1" salida del modelo de desarenador en acrílico hacia el tanque inicial para realizar la recirculación del sistema.
- VB) Válvulas de bola ubicadas en sistema para el cierre y calibración del caudal.

2.1.1 Tanque inicial, motor de 110 V y aspas de mezcla

En el tanque inicial de 250 litros se instaló un motor de 110V con aspas para mantener en movimiento el material y evitar su sedimentación al inicio del sistema.

Ilustración 50. Tanque inicial, motor y aspas de mezcla



Fuente: elaboración propia.

2.1.1 Motobomba agrícola, mangueras de succión e impulsión

Se instaló una motobomba agrícola para bombear desde el tanque inicial hacia el tanque elevado.

Ilustración 51. Motobomba agrícola, mangueras de succión e impulsión



Fuente: elaboración propia.

2.1.1 Tanque elevado, manguera de alimentación y pantallas deflectoras

Sobre el modelo acrílico se instaló un tanque elevado para abastecer al sistema.

Ilustración 52. Tanque elevado y manguera de alimentación al sistema



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 53. Pantalla deflectora horizontal con 20 orificios



Fuente: elaboración propia.

2.1.1 Sistema completo

A continuación se muestra el sistema completo.

Ilustración 54. Secuencia del sistema completo





Fuente: elaboración propia.

2.1.2 Resumen del montaje hidráulico del sistema

Al inicio del sistema se instaló un tanque bajito inicial de 250 litros para verter los sedimentos. Posteriormente, se colocó un motor de 110v de $\frac{1}{2}$ Hp en la parte superior del tanque, al que se le adaptaron unas aspas para mantener en constante movimiento la mezcla inicial de agua - sedimentos y evitar que el material se sedimentara en la parte inferior del tanque. Se instaló una motobomba de 1,8 Hp para enviar la mezcla agua-sedimentos desde el tanque inicial hacia el tanque elevado de 250 litros. Esta bomba cuenta con un impulsor semiabierto que le permite dejar pasar partículas hasta $\frac{1}{4}$ de pulgada o 6,4 mm sin perjudicar su buen funcionamiento.

El caudal del sistema se calibró con las válvulas de bola ubicadas en diferentes partes hasta obtener el deseado, buscando que los caudales de entrada y de salida fueran iguales o muy parecidos.

Desde el tanque elevado se alimenta el sistema a la cámara de entrada, la cual se encarga de repartir el caudal a través de las pantallas deflectoras ubicadas en el modelo. Estas pantallas pueden ser de tres tipos, según la ubicación de los orificios: horizontales, verticales u horizontales y verticales. Una vez transcurrido el tiempo de retención hidráulico del modelo pasa por un vertedero de salida que entrega el caudal a la tubería de salida, el cual desemboca nuevamente en el tanque inicial, generando recirculación del sistema y evitando desperdicio de agua en las diferentes pruebas de laboratorios.

3. Ensayos de laboratorio

A continuación se presentan los resultados de los ensayos de laboratorio.

3.1 Laboratorios de granulometría

El material seleccionado para realizar las pruebas de laboratorio de sedimentación fue la antracita, con una densidad relativa de 1,7 y diámetros de partículas entre 2,38 y 0,84 mm.

Ilustración 55. Muestra de la antracita seleccionada



Fuente: elaboración propia.

Se realizó el laboratorio inicial para verificar los diámetros del material.

Ilustración 56. Antracita seleccionada para triturar



Fuente: elaboración propia.

El laboratorio de granulometría por tamizado se realizó de acuerdo con la NTC1522.

3.1.1 Laboratorio de granulometría 1 (muestra inicial)

Tabla 9. Laboratorio de granulometría 1 (muestra inicial)

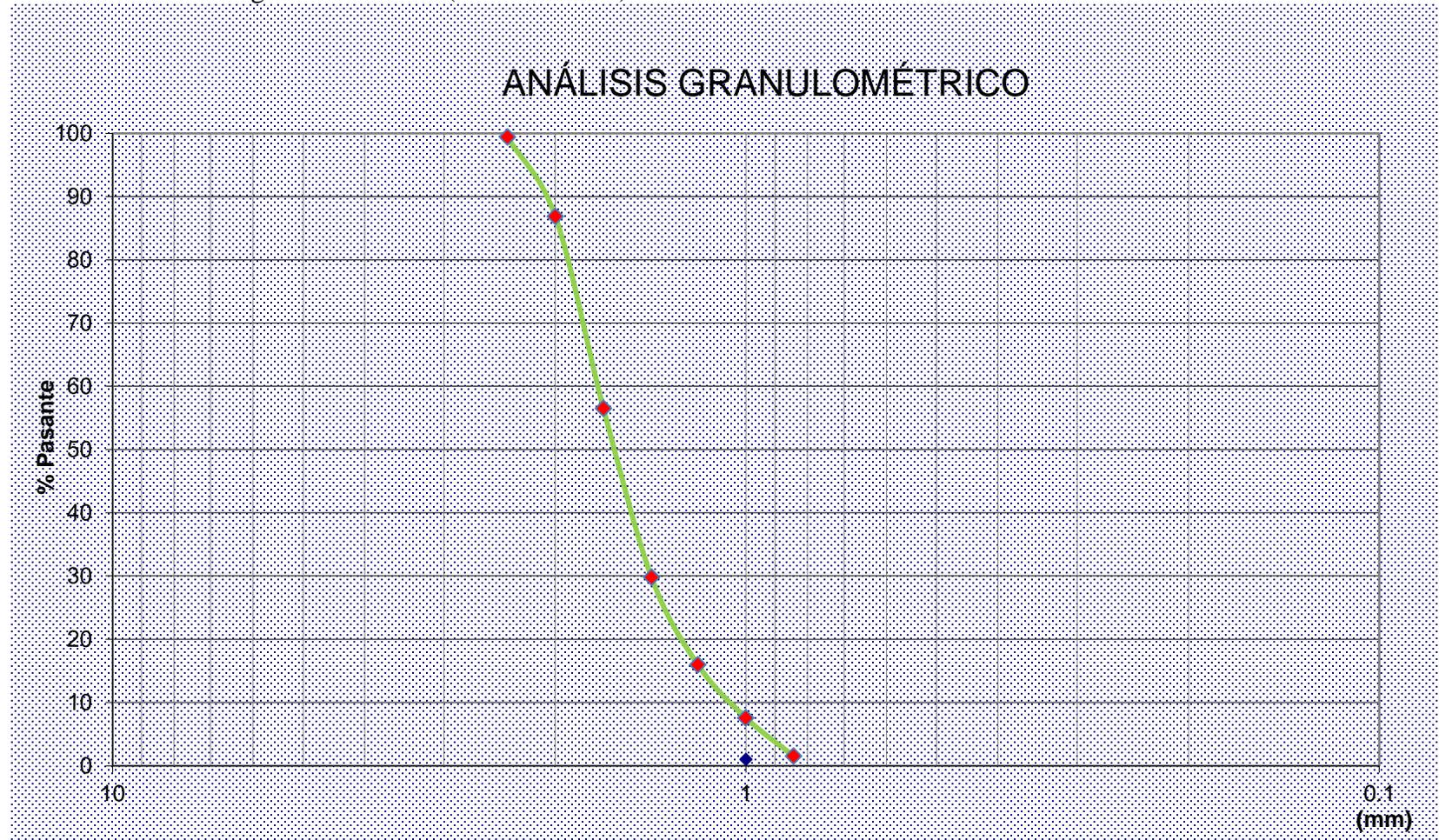
	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
	ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIOAMBIENTE
ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO	
TESIS:	ESTUDIO DE UN MODELO FÍSICO A ESCALA DE UN DESARENADOR, PARA ESTABLECER LA EFICIENCIA DE TRES TIPOS DE PANTALLAS DEFLECTORAS.
Estudiante:	ING. PABLO GABRIEL HENAO ARBELÁEZ
Director de tesis:	ING. HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ
N° LABORATORIO:	1

Desing. del Tamiz US	Pulgadas	Milímetros	A Peso Retenido gr,	B % Pasante	% Más grueso	% Más fino	PESO TOTAL DE LA MUESTRA		
							(P.T.M.)		
4							200 gr,		
3	3	76,2		0,00	0,00	100,00			
2 1/2	2.5	63,5		0,00	0,00	100,00			
2	2	50,8		0,00	0,00	100,00	N° LABORATORIO: 1		
1 1/2	1,5	38,1		0,00	0,00	100,00	Desing. del Tamiz US	Milímetros	% Más fino
1	1	25,4		0,00	0,00	100,00	N° 8	2,380	99,43
3/4	0,75	19,05		0,00	0,00	100,00	N° 10	1,999	86,84
1/2	0,5	12,7		0,00	0,00	100,00	N° 12	1,679	56,53
3/8	0,375	9,525		0,00	0,00	100,00	N° 14	1,410	29,80
1/4	0,250	6,350		0,00	0,00	100,00	N° 16	1,191	15,97
N° 4	0,187	4,750		0,00	0,00	100,00	N° 18	1,001	7,56
N° 8	0,0937	2,380	1,14	0,57	0,57	99,43	N° 20	0,841	1,52
N° 10	0,0787	1,999	25,18	12,59	13,16	86,84	P N° 200		0,03
N° 12	0,0661	1,679	60,62	30,31	43,47	56,53			
N° 14	0,0555	1,410	53,47	26,74	70,21	29,80			
N° 16	0,0469	1,191	27,65	13,83	84,03	15,97			
N° 18	0,0394	1,001	16,82	8,41	92,44	7,56			
N° 20	0,0331	0,841	12,09	6,05	98,49	1,52			
N° 30	0,0234	0,594		0,00	98,49	1,52			
N° 40	0,0165	0,419		0,00	98,49	1,52			
N° 50	0,0117	0,297		0,00	98,49	1,52			
N° 60	0,0098	0,249		0,00	98,49	1,52			
N° 80	0,0070	0,178		0,00	98,49	1,52			
N° 100	0,0059	0,150		0,00	98,49	1,52			
N° 200	0,0029	0,074		0,00	98,49	1,52			
P N° 200			2,97	1,49	99,97	0,03			

Fuente: elaboración propia.

Tamaño efectivo D10 (10%): 1,07
 D60 1,72
 Coeficiente de uniformidad (60%/10%): 1,61

Ilustración 57. Curva granulométrica 1 (muestra inicial)



Fuente: elaboración propia.

En la primera prueba de laboratorio de granulometría se identificó que el diámetro del material presentaba gran cantidad de diámetros mayores a 1,2 mm, por lo cual se hizo necesario triturar un poco el material para reducir los diámetros y tener partículas menores a 0,84 mm.

Ilustración 58. Triturador de material



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 59. Antracita triturada



Fuente: elaboración propia.

Una vez molido parte del material, nuevamente se realizó el laboratorio de granulometría por tamizado.

3.1.1 Laboratorio de granulometría 2 (muestra triturada)

Tabla 10. Laboratorio de granulometría 2 (muestra triturada)



ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO
MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL
ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIOAMBIENTE

ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO			
TESIS:	ESTUDIO DE UN MODELO FÍSICO A ESCALA DE UN DESARENADOR, PARA ESTABLECER LA EFICIENCIA DE TRES TIPOS DE PANTALLAS DEFLECTORAS.		
Estudiante:	ING. PABLO GABRIEL HENAO ARBELÁEZ		
Director de tesis:	ING. HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ	Nº LABORATORIO:	2

Desing. del Tamiz US	Pulgadas	Milímetros	A Peso retenido gr,	B % pasante	% Más grueso	% Más fino	PESO TOTAL DE LA MUESTRA		
4							(P.T.M.) 1524,8 gr,		
3	3	76,2		0,00	0,00	100,00			
2 1/2	2,5	63,5		0,00	0,00	100,00			
2	2	50,8		0,00	0,00	100,00	Nº LABORATORIO: 2		
1 1/2	1,5	38,1		0,00	0,00	100,00	Desing. del Tamiz US	milímetros	% Más Fino
1	1	25,4		0,00	0,00	100,00	Nº 10	1,999	99,79
3/4	0,75	19,05		0,00	0,00	100,00	Nº 12	1,679	97,43
1/2	0,5	12,7		0,00	0,00	100,00	Nº 16	1,191	79,18
3/8	0,375	9,525		0,00	0,00	100,00	Nº 20	0,841	49,38
1/4	0,250	6,350		0,00	0,00	100,00	Nº 30	0,594	34,67
Nº 4	0,187	4,750		0,00	0,00	100,00	Nº 40	0,419	18,95
Nº 8	0,0937	2,380		0,00	0,00	100,00	Nº 60	0,249	11,26
Nº 10	0,0787	1,999	3,20	0,21	0,21	99,79	Nº 80	0,178	7,90
Nº 12	0,0661	1,679	36,00	2,36	2,57	97,43	Nº 100	0,150	6,49
Nº 16	0,0469	1,191	278,20	18,25	20,82	79,18	Nº 200	0,074	2,30
Nº 20	0,0331	0,841	454,50	29,81	50,62	49,38	P Nº 200		0,26
Nº 30	0,0234	0,594	224,30	14,71	65,33	34,67			
Nº 40	0,0165	0,419	239,60	15,71	81,05	18,95			
Nº 50	0,0117	0,297		0,00	81,05	18,95			
Nº 60	0,0098	0,249	117,30	7,69	88,74	11,26			
Nº 80	0,0070	0,178	51,20	3,36	92,10	7,90			
Nº 100	0,0059	0,150	21,60	1,42	93,51	6,49			
Nº 200	0,0029	0,074	63,90	4,19	97,70	2,30			
P Nº 200			31	2,03	99,74	0,26			

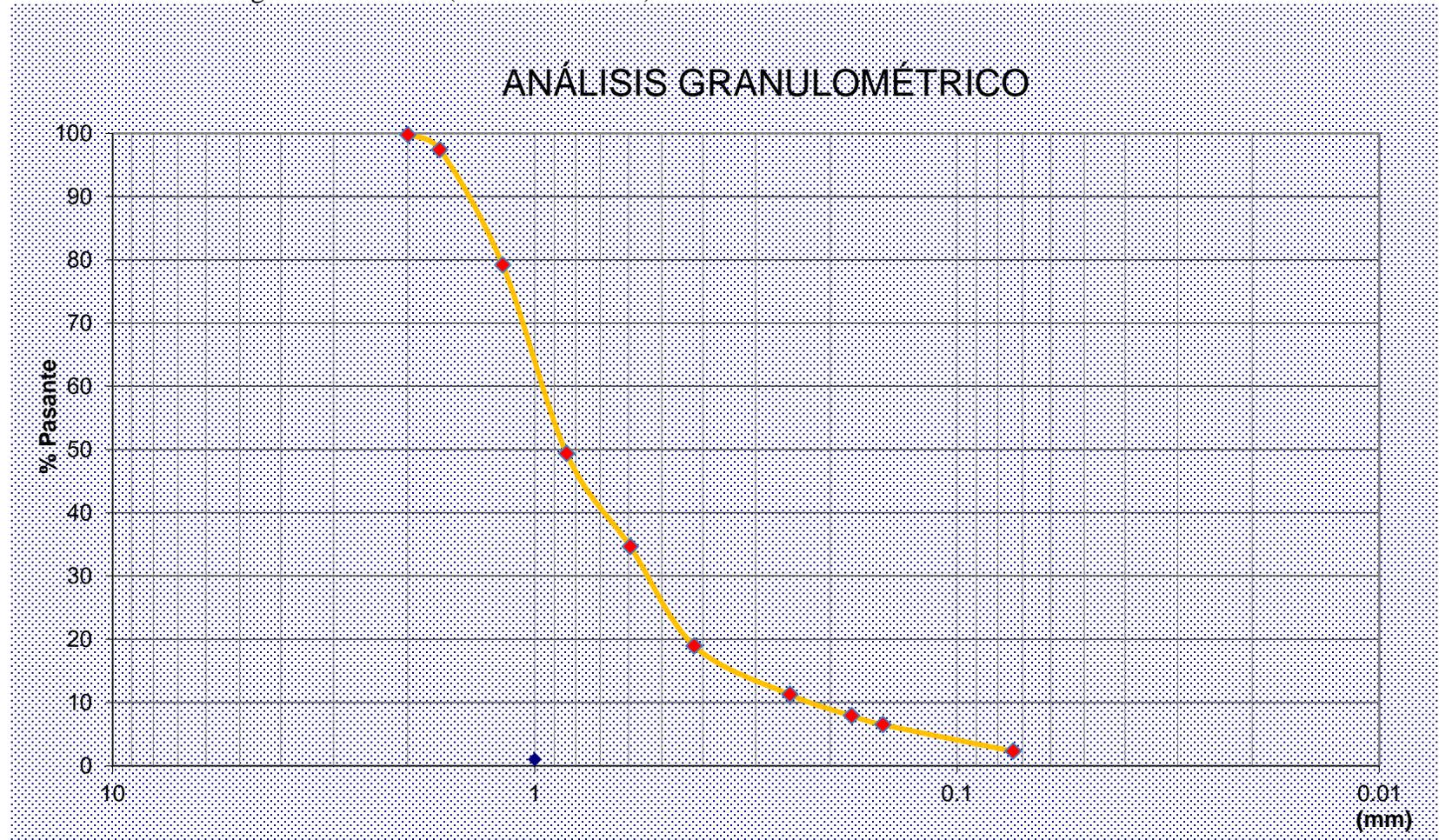
Fuente: elaboración propia.

Tamaño efectivo D10 (10%): 0,23

D60 0,99

Coefficiente de uniformidad (60%/10%): 4,38

Ilustración 60. Curva granulométrica 2 (muestra triturada)



Fuente: elaboración propia.

Se realizó un tercer laboratorio de granulometría, mezclando en porciones iguales el material inicial con el triturado. La mezcla resultante se empleó para realizar la modelación hidráulica del desarenador y, posteriormente, los laboratorios de sedimentación.

3.1.1 Laboratorio de granulometría 3 (muestra inicial mas muestra triturada)

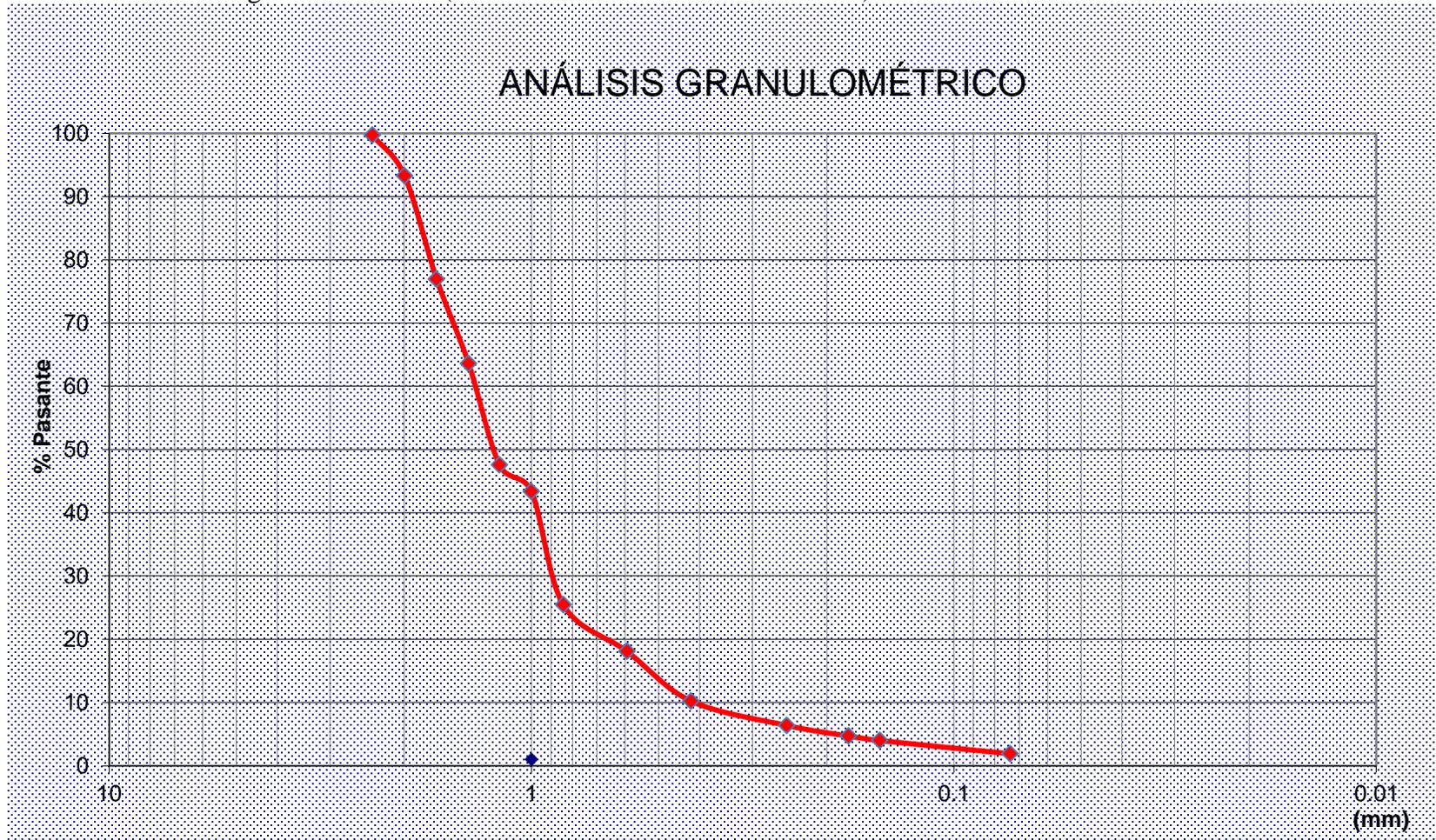
Tabla 11. Laboratorio de granulometría 3 (muestra inicial más muestra triturada)

 ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO		ESCUELA COLOMBIANA DE INGENIERÍA JULIO GARAVITO MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL ÉNFASIS EN RECURSOS HIDRÁULICOS Y MEDIO AMBIENTE							
ENSAYO GRANULOMÉTRICO POR TAMIZADO									
TESIS: ESTUDIO DE UN MODELO FÍSICO A ESCALA DE UN DESARENADOR, PARA ESTABLECER LA EFICIENCIA DE TRES TIPOS DE PANTALLAS DEFLECTORAS.									
Estudiante: ING. PABLO GABRIEL HENAO ARBELÁEZ									
Director de tesis: ING. HÉCTOR MATAMOROS RODRÍGUEZ		N° LABORATORIO:		3					
Desing. del Tamiz US	Pulgadas	Milímetros	A Peso Retenido gr,	B % pasante	% Más grueso	% Más fino	PESO TOTAL DE LA MUESTRA		
4							(P.T.M.)		
3	3	76,2		0,00	0,00	100,00	3049,6 gr,		
2 1/2	2,5	63,5		0,00	0,00	100,00			
2	2	50,8		0,00	0,00	100,00	N° LABORATORIO: 3		
1 1/2	1,5	38,1		0,00	0,00	100,00	Desing. del Tamiz US	milímetros	% Más Fino
1	1	25,4		0,00	0,00	100,00	N° 8	2,380	99,72
3/4	0,75	19,05		0,00	0,00	100,00	N° 10	1,999	93,32
1/2	0,5	12,7		0,00	0,00	100,00	N° 12	1,679	76,98
3/8	0,375	9,525		0,00	0,00	100,00	N° 14	1,410	63,61
1/4	0,250	6,350		0,00	0,00	100,00	N° 16	1,191	47,58
N° 4	0,187	4,750		0,00	0,00	100,00	N° 18	1,001	43,37
N° 8	0,0937	2,380	8,69	0,29	0,29	99,72	N° 20	0,841	25,45
N° 10	0,0787	1,999	195,17	6,40	6,68	93,32	N° 30	0,594	18,09
N° 12	0,0661	1,679	498,17	16,34	23,02	76,98	N° 40	0,419	10,23
N° 14	0,0555	1,410	407,66	13,37	36,39	63,61	N° 60	0,249	6,39
N° 16	0,0469	1,191	489,00	16,04	52,42	47,58	N° 80	0,178	4,71
N° 18	0,0394	1,001	128,24	4,21	56,63	43,37	N° 100	0,150	4,00
N° 20	0,0331	0,841	546,67	17,93	74,55	25,45	N° 200	0,074	1,91
N° 30	0,0234	0,594	224,30	7,36	81,91	18,09	P N° 200		0,15
N° 40	0,0165	0,419	239,60	7,86	89,77	10,23			
N° 50	0,0117	0,297	0,00	0,00	89,77	10,23			
N° 60	0,0098	0,249	117,30	3,85	93,61	6,39			
N° 80	0,0070	0,178	51,20	1,68	95,29	4,71			
N° 100	0,0059	0,150	21,60	0,71	96,00	4,00			
N° 200	0,0029	0,074	63,90	2,10	98,09	1,91			
P N° 200			53,64	1,76	99,85	0,15			

Fuente: elaboración propia.

Tamaño efectivo D10 (10%): 0,41
 D60 1,37
 Coeficiente de uniformidad (60%/10%): 3,33

Ilustración 61. Curva granulométrica 3 (muestra inicial mas muestra triturada)



Fuente: elaboración propia.

3.1 Laboratorios de sedimentación

Para realizar este ensayo se utilizó el material del laboratorio de granulometría número 3. Se decidió agregar el material gradualmente cada 60 segundos sobre el tanque inicial de 250 litros, el cual se mantuvo en movimiento con el motor de 110V y las aspas instaladas para que el material no se sedimentara en el fondo del tanque inicial.

Se estableció generar muestras de 15 gramos para verterlas al tanque inicial cada 60 segundos.

Ilustración 62. Medición del material para el ensayo



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 63. Material para el ensayo



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 64. Muestras pesadas para un laboratorio



Fuente: elaboración propia.

Se prepararon las muestras para verter cada 60 segundos en el tanque inicial.

Ilustración 65. Medición del material para el ensayo



Fuente: elaboración propia.

Se realizaron nueve ensayos del modelo de desarenador en acrílico, con las siguientes características:

1. Ensayo 1. Pantalla deflectora ubicada horizontalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal mayor.
2. Ensayo 2. Pantalla deflectora ubicada horizontalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal medio.
3. Ensayo 3. Pantalla deflectora ubicada horizontalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal menor.
4. Ensayo 4. Pantalla deflectora ubicada verticalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal mayor.
5. Ensayo 5. Pantalla deflectora ubicada verticalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal medio.
6. Ensayo 6. Pantalla deflectora ubicada verticalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal menor.
7. Ensayo 7. Pantallas deflectoras ubicadas horizontalmente con 11 orificios y verticalmente con 9 orificios, evaluado con el caudal mayor.
8. Ensayo 8. Pantallas deflectoras ubicadas horizontalmente con 11 orificios y verticalmente con 9 orificios, evaluado con el caudal medio.
9. Ensayo 9. Pantallas deflectoras ubicadas horizontalmente con 11 orificios y verticalmente con 9 orificios, evaluado con el caudal menor.

Ilustración 66. Conos Imhoff y soporte de conos en madera



Fuente: elaboración propia.

Para iniciar el ensayo de laboratorio se calibró el caudal deseado y se estabilizó el sistema, procurando que el caudal suministrado fuera igual o parecido al de salida.

Ilustración 67. Probeta de plástico y cronómetro para medir el caudal



Fuente: elaboración propia.

Para ensayar el modelo hidráulico en acrílico del desarenador y medir los sedimentos se tomaron dos muestras al inicio del sistema (en la manguera de alimentación que va desde el tanque elevado hacia el modelo hidráulico). Una vez transcurrido el periodo de retención hidráulico del modelo se tomaron dos muestras al finalizar (en la manguera que va desde la salida de modelo hacia el tanque inicial, manguera de recirculación del sistema).

Se tomaron dos muestras iniciales de un litro cada una en el cono Imhoff, se dejó asentar el material durante 45 minutos. Luego, se agitaron suavemente las paredes del cono Imhoff y se dejó asentar nuevamente por 15 minutos. Se midió la cantidad de material sedimentado en el fondo del cono y se hizo el registro. Este procedimiento se repitió para las dos muestras que se tomaron a la salida del sistema.

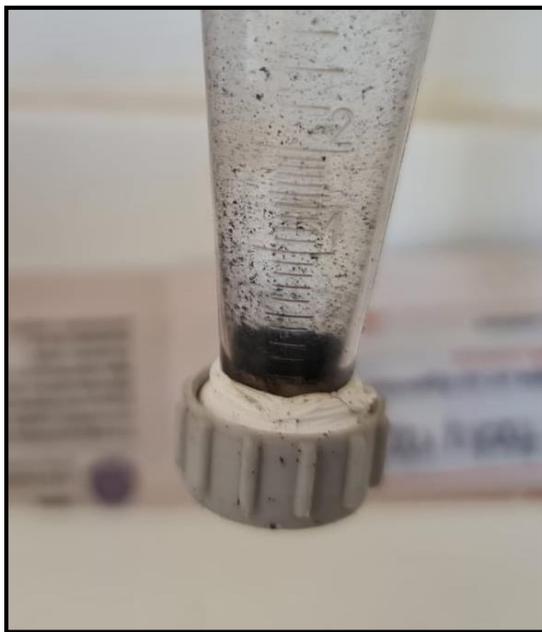
Se realizó el Ensayo 1 del modelo en acrílico con una pantalla deflectora horizontal de 20 orificios.

Ilustración 68. Sedimentos del Ensayo 1 (muestra inicial)



Fuente: elaboración propia.

Ilustración 69. Sedimentos del Ensayo 1 (muestra final)



Fuente: elaboración propia.

3.1.1 Ensayo 1. Pantalla deflectora ubicada horizontalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal mayor

Una vez calibrado el sistema para el caudal mayor se hicieron tres mediciones para contemplar un caudal promedio.

Ilustración 70. Pantalla deflectora horizontal con 20 orificios, ubicada en el modelo hidráulico



Fuente: elaboración propia.

3.1.1.1 Medición del caudal Ensayo 1

Se midió el caudal por el método volumétrico. Se hicieron tres mediciones y se calculó un caudal promedio.

$$Q_1 = \frac{V}{t} = \frac{1,14}{4,74} = 0,24050633(l/s)$$

$$Q_2 = \frac{V}{t} = \frac{1,46}{5,96} = 0,24496644(l/s)$$

$$Q_3 = \frac{V}{t} = \frac{1,08}{4,44} = 0,24324324(l/s)$$

Tabla 12. Medición de caudal (Ensayo 1)

Ensayo 1			
Medición del caudal			
#	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (l/s)
Q ₁	1,14	4,74	0,24050633
Q ₂	1,46	5,96	0,24496644
Q ₃	1,08	4,44	0,24324324

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{0,24050633 + 0,24496644 + 0,24324324}{3}$$

$$= 0,242905338(l/s) = 14,57432031(l/m)$$

3.1.1.2 Concentración de sedimentos (Ensayo 1)

Se calculó la concentración del material agregando 15 gramos cada 60 segundos:

$$Concentración = \frac{Material\ ingresado * 1000}{Q_{prom}} = \frac{(15 * 1000)}{14,57432031} = 1029,21(mg * l)$$

3.1.1.3 Muestras de sedimentación (Ensayo 1)

Tabla 13. Datos de las muestras (Ensayo 1)

Ensayo 1			
Muestra inicial (gramos)		Muestra final (gramos)	
#1	#2	#3	#4
1,1	1,2	0,1	0,15
Promedio de la muestra Inicial (gramos)		Promedio de la muestra final (gramos)	
1,15		0,125	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 14. % de remoción de las muestras (Ensayo 1)

% de remoción		
#1 Vs #3	#2 Vs #4	Prom. inicial vs. Prom. final
90,9%	87,5%	89,1%

Fuente: elaboración propia.

3.1.2 Ensayo 2. Pantalla deflectora ubicada horizontalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal medio

3.1.2.1 Medición del caudal (Ensayo 2)

Se midió el caudal por el método volumétrico. Se hicieron tres mediciones y se calculó un caudal promedio.

$$Q_1 = \frac{V}{t} = \frac{1,32}{6,22} = 0,21221865(l/s)$$

$$Q_2 = \frac{V}{t} = \frac{1,56}{7,32} = 0,21311475(l/s)$$

$$Q_3 = \frac{V}{t} = \frac{1,22}{5,94} = 0,20538721(l/s)$$

Tabla 15. Medición del caudal (Ensayo 2)

Ensayo 2			
Medición del caudal			
#	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (l/s)
Q ₁	1,32	6,22	0,21221865
Q ₂	1,56	7,32	0,21311475
Q ₃	1,22	5,94	0,20538721

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{0,21221865 + 0,21311475 + 0,20538721}{3} = 0,210240203(l/s) = 12,61441218(l/m)$$

3.1.2.2 Concentración de sedimentos (Ensayo 2)

Se calculó la concentración del material agregando 15 gramos cada 60 segundos:

$$Concentración = \frac{Material\ ingresado * 1000}{Q_{prom}} = \frac{(15 * 1000)}{12,61441218} = 1189,12 (mg * l)$$

3.1.2.3 Muestras de sedimentación (Ensayo 2)

Tabla 16. Datos de las muestras (Ensayo 29)

Ensayo 2			
Muestra inicial (gramos)		Muestra final (gramos)	
#1	#2	#3	#4
1,15	1,1	0,14	0,17
Promedio de la muestra Inicial (gramos)		Promedio de la muestra final (gramos)	
1,125		0,155	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 17. % de remoción de las muestras (Ensayo 2)

% de remoción		
#1 Vs #3	#2 Vs #4	Prom. inicial vs. Prom. final
87,8%	84,5%	86,2%

Fuente: elaboración propia.

3.1.3 Ensayo 3. Pantalla deflectora ubicada horizontalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal menor

3.1.3.1 Medición del caudal (Ensayo 3)

Se midió el caudal por el método volumétrico. Se hicieron tres mediciones y se calculó un caudal promedio.

$$Q_1 = \frac{V}{t} = \frac{1,42}{9,76} = 0,1454918(l/s)$$

$$Q_2 = \frac{V}{t} = \frac{1,38}{9,32} = 0,14806867(l/s)$$

$$Q_3 = \frac{V}{t} = \frac{1,56}{10,26} = 0,15204678(l/s)$$

Tabla 18. Medición del caudal (Ensayo 3)

Ensayo 3			
Medición del caudal			
#	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (l/s)
Q ₁	1,42	9,76	0,145491803
Q ₂	1,38	9,32	0,14806867
Q ₃	1,56	10,26	0,152046784

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{0,145491803 + 0,14806867 + 0,152046784}{3}$$

$$= 0,148535752(l/s) = 8,912145129(l/m)$$

3.1.3.2 Concentración de sedimentos (Ensayo 3)

Se calculó la concentración del material agregando 15 gramos de material cada 60 segundos:

$$Concentración = \frac{Material\ ingresado * 1000}{Q_{prom}} = \frac{(15 * 1000)}{8,912145129} = 1683,10(mg * l)$$

3.1.3.3 Muestras de sedimentación (Ensayo 3)

Tabla 19. Datos de las muestras (Ensayo 3)

Ensayo 3			
Muestra inicial (gramos)		Muestra final (gramos)	
#1	#2	#3	#4
0.9	0.8	0.11	0.095
Promedio de la muestra inicial (gramos)		Promedio de la muestra final (gramos)	
0,85		0,1025	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 20. % de remoción de las muestras (Ensayo 3)

% de remoción		
#1 Vs #3	#2 Vs #4	Prom. inicial vs. Prom. final
87,8%	88,1%	87,9%

Fuente: elaboración propia.

3.1.4 Ensayo 4. Pantalla deflectora ubicada verticalmente con 20 orificios, evaluado con el caudal mayor

Después de calibrar el sistema para el caudal mayor se hicieron tres mediciones para contemplar un caudal promedio.

Este mismo procedimiento se hizo para los ensayos 1, 2 y 3, cambiando la pantalla deflectora de su orientación horizontal a la vertical.

Ilustración 71. Pantalla deflectora vertical con 20 orificios



Fuente: elaboración propia.

3.1.4.1 Medición del caudal (Ensayo 4)

Se midió el caudal por el método volumétrico y se hicieron tres mediciones para calcular un promedio.

$$Q_1 = \frac{V}{t} = \frac{1,20}{4,9} = 0,24489796(l/s)$$

$$Q_2 = \frac{V}{t} = \frac{1,25}{5,16} = 0,24224806(l/s)$$

$$Q_3 = \frac{V}{t} = \frac{1,45}{5,84} = 0,24828767(l/s)$$

Tabla 21. Medición del caudal (Ensayo 4)

Ensayo 4			
Medición del caudal			
#	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (l/s)
Q ₁	1,20	4,9	0,244897959
Q ₂	1,25	5,16	0,242248062
Q ₃	1,45	5,84	0,248287671

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{0,244897959 + 0,242248062 + 0,248287671}{3}$$

$$= 0,245144564(l/s) = 14,70867385(l/m)$$

3.1.4.2 Concentración de sedimentos (Ensayo 4)

Se calculó la concentración del material agregando 15 gramos de material cada 60 segundos:

$$Concentración = \frac{Material\ ingresado * 1000}{Q_{prom}} = \frac{(15 * 1000)}{14,70867385} = 1019,81(mg * l)$$

3.1.4.3 Muestras de sedimentación (Ensayo 4)

Tabla 22. Datos de las muestras (Ensayo 4)

Ensayo 4			
Muestra inicial (gramos)		Muestra final (gramos)	
#1	#2	#3	#4
2,1	1,9	0,4	0,3
Promedio de la muestra inicial (gramos)		Promedio de la muestra final (gramos)	
2		0,35	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 23. % de remoción de las muestras (Ensayo 4)

% de remoción		
#1 Vs #3	#2 Vs #4	Prom. inicial vs. Prom. final
81,0%	84,2%	82,5%

Fuente: elaboración propia.

3.1.5 Ensayo 5. Pantalla deflectora con 20 orificios ubicada verticalmente, evaluado con el caudal medio

3.1.5.1 Medición del caudal (Ensayo 5)

Se midió el caudal por el método volumétrico y se hicieron tres mediciones para calcular un caudal promedio.

$$Q_1 = \frac{V}{t} = \frac{1,45}{7,28} = 0,199175824(l/s)$$

$$Q_2 = \frac{V}{t} = \frac{1,46}{7,84} = 0,18622449(l/s)$$

$$Q_3 = \frac{V}{t} = \frac{1,54}{8,04} = 0,191542289(l/s)$$

Tabla 24. Medición del caudal (Ensayo 5)

Ensayo 5			
Medición del caudal			
#	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (l/s)
Q ₁	1,45	7,28	0,199175824
Q ₂	1,46	7,84	0,18622449
Q ₃	1,54	8,04	0,191542289

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{0,199175824 + 0,18622449 + 0,191542289}{3} = 0,192314201(l/s) = 11,53885205(l/m)$$

3.1.5.2 Concentración de sedimentos (Ensayo 5)

Se calculó la concentración del material agregando 15 gramos de material cada 60 segundos:

$$Concentración = \frac{Material\ ingresado * 1000}{Q_{prom}} = \frac{(15 * 1000)}{11,53885205} = 1299,96(mg * l)$$

3.1.5.3 Muestras de sedimentación (Ensayo 5)

Tabla 25. Datos de las muestras (Ensayo 5)

Ensayo 5			
Muestra inicial (gramos)		Muestra final (gramos)	
#1	#2	#3	#4
1,7	1,5	0,25	0,3
Promedio de la muestra inicial (gramos)		Promedio de la muestra final (gramos)	
1,6		0,275	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 26. % de remoción de las muestras (Ensayo 5)

% de remoción		
#1 Vs #3	#2 Vs #4	Prom. inicial vs. Prom. final
85,3%	80,0%	82,8%

Fuente: elaboración propia.

3.1.6 Ensayo 6. Pantalla deflectora con 20 orificios ubicada verticalmente, evaluado con el caudal menor

3.1.6.1 Medición del caudal (Ensayo 6)

Se midió el caudal por el método volumétrico y se hicieron tres mediciones para calcular un caudal promedio.

$$Q_1 = \frac{V}{t} = \frac{1,62}{9,98} = 0,16232465(l/s)$$

$$Q_2 = \frac{V}{t} = \frac{1,72}{10,62} = 0,16195857(l/s)$$

$$Q_3 = \frac{V}{t} = \frac{1,32}{8,06} = 0,16377171(l/s)$$

Tabla 27. Medición del caudal (Ensayo 6)

Ensayo 6			
Medición del caudal			
#	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (l/s)
Q ₁	1,62	9,98	0,162324649
Q ₂	1,72	10,62	0,161958569
Q ₃	1,32	8,06	0,163771712

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{0,162324649 + 0,161958569 + 0,163771712}{3}$$

$$= 0,162684977(l/s) = 9,761098604(l/m)$$

3.1.6.2 Concentración de sedimentos (Ensayo 6)

Se calculó la concentración del material agregando 15 gramos de material cada 60 segundos:

$$Concentración = \frac{Material\ ingresado * 1000}{Q_{prom}} = \frac{(15 * 1000)}{9,761098604} = 1536,71(mg * l)$$

3.1.6.3 Muestras de sedimentación (Ensayo 6)

Tabla 28. Datos de las muestras (Ensayo 6)

Ensayo 6			
Muestra inicial (gramos)		Muestra final (gramos)	
#1	#2	#3	#4
1,9	1,7	0,35	0,3
Promedio de la muestra inicial (gramos)		Promedio de la muestra final (gramos)	
1,8		0,325	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 29. % de remoción de las muestras (Ensayo 6)

% de remoción		
#1 Vs #3	#2 Vs #4	Prom. inicial vs. Prom. final
81,6%	82,4%	81,9%

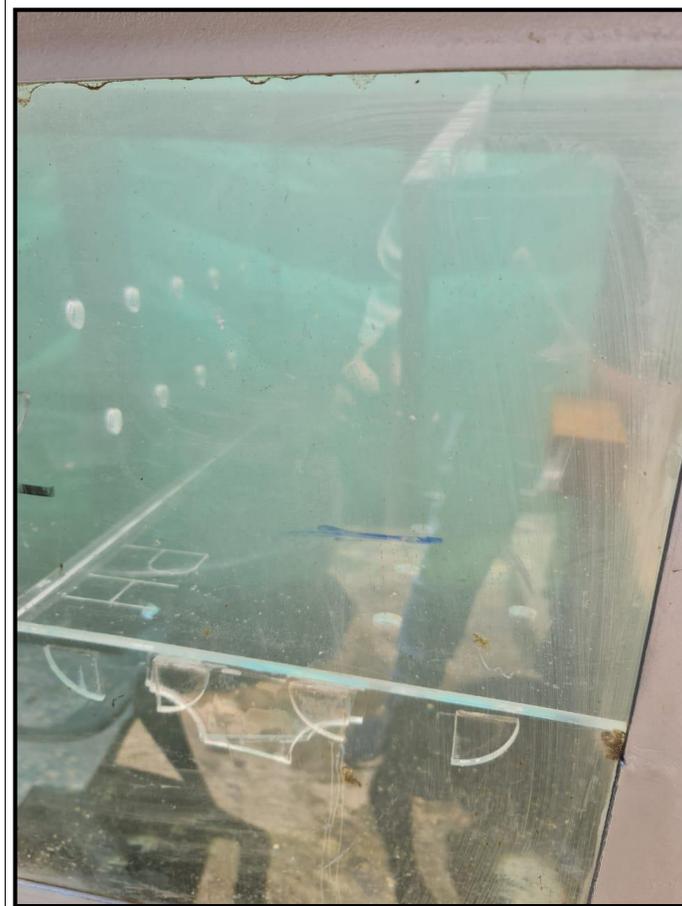
Fuente: elaboración propia.

3.1.7 Ensayo 7. Pantallas deflectoras con 9 orificios (verticalmente) y 11 orificios (horizontalmente), evaluado con el caudal mayor

Una vez calibrado el sistema para el caudal mayor se realizaron tres mediciones para calcular un caudal promedio.

Este mismo procedimiento se hizo para los ensayos 1, 2, 3, 4, 5 y 6, cambiando la pantalla deflectora, ubicada verticalmente, y se colocaron dos pantallas más, una vertical con 9 orificios y otra horizontal con 11 orificios.

Ilustración 72. Pantallas deflectoras del modelo hidráulico (vertical con 9 orificios y horizontal con 11 orificios).



Fuente: elaboración propia.

3.1.7.1 Medición del caudal (Ensayo 7)

Se midió el caudal por el método volumétrico y se hicieron tres mediciones para calcular un caudal promedio.

$$Q_1 = \frac{V}{t} = \frac{1,28}{5,34} = 0,23970037(l/s)$$

$$Q_2 = \frac{V}{t} = \frac{1,76}{6,98} = 0,252149(l/s)$$

$$Q_3 = \frac{V}{t} = \frac{1,18}{4,76} = 0,24789916(l/s)$$

Tabla 30. Medición del caudal (Ensayo 7)

Ensayo 7			
Medición del caudal			
#	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (l/s)
Q ₁	1,28	5,34	0,239700375
Q ₂	1,76	6,98	0,252148997
Q ₃	1,18	4,76	0,24789916

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{0,239700375 + 0,252148997 + 0,24789916}{3} = 0,246582844(l/s) = 14,79497063(l/m)$$

3.1.7.2 Concentración de sedimentos (Ensayo 7)

Se calculó la concentración del material agregando 15 gramos de material cada 60 segundos:

$$Concentración = \frac{Material\ ingresado * 1000}{Q_{prom}} = \frac{(15 * 1000)}{14,79497063} = 1013,86(mg * l)$$

3.1.7.3 Muestras de sedimentación (Ensayo 7)

Tabla 31. Datos de las muestras (Ensayo 7)

Ensayo 7			
Muestra inicial (gramos)		Muestra final (gramos)	
#1	#2	#3	#4
1,5	1,2	0,37	0,42
Promedio de la muestra inicial (gramos)		Promedio de la muestra final (gramos)	
1,35		0,395	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 32. % de remoción de las muestras (Ensayo 7)

% de remoción		
#1 Vs #3	#2 Vs #4	Prom. inicial vs. Prom. final
75,3%	65,0%	70,7%

Fuente: elaboración propia.

3.1.8 Ensayo 8. Pantallas deflectoras vertical con 9 orificios y horizontal con 11 orificios, evaluado con el caudal medio

3.1.8.1 Medición del caudal (Ensayo 8)

Se midió el caudal por el método volumétrico y se hicieron tres mediciones para calcular un caudal promedio.

$$Q_1 = \frac{V}{t} = \frac{1,48}{7,22} = 0,20498615(l/s)$$

$$Q_2 = \frac{V}{t} = \frac{1,36}{7,02} = 0,19373219(l/s)$$

$$Q_3 = \frac{V}{t} = \frac{1,3}{6,54} = 0,19877676(l/s)$$

Tabla 33. Medición del caudal (Ensayo 8)

Ensayo 8			
Medición del caudal			
#	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (l/s)
Q ₁	1,48	7,22	0,20498615
Q ₂	1,36	7,02	0,193732194
Q ₃	1,3	6,54	0,198776758

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{0,20498615 + 0,193732194 + 0,198776758}{3}$$

$$= 0,19165034(l/s) = 11,94990203(l/m)$$

3.1.8.2 Concentración de sedimentos (Ensayo 8)

Se calculó la concentración del material agregando 15 gramos de material cada 60 segundos:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{Material ingresado} * 1000}{Q_{prom}} = \frac{(15 * 1000)}{11,94990203} = 1255,24(mg * l)$$

3.1.8.3 Muestras de sedimentación (Ensayo 8)

Tabla 34. Datos de las muestras (Ensayo 8)

Ensayo 8			
Muestra inicial (gramos)		Muestra final (gramos)	
#1	#2	#3	#4
1,7	1,6	0,45	0,4
Promedio de la muestra inicial (gramos)		Promedio de la muestra final (gramos)	
1,65		0,425	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 35. % de remoción de las muestras (Ensayo 8)

% de remoción		
#1 Vs #3	#2 Vs #4	Prom. inicial vs. Prom. final
73,5%	75,0%	74,2%

Fuente: elaboración propia.

3.1.9 Ensayo 9. Pantallas deflectoras vertical con 9 orificios y horizontal con 11 orificios, evaluado con el caudal menor

3.1.9.1 Medición del caudal (Ensayo 9)

Se midió el caudal por el método volumétrico y se hicieron tres mediciones para calcular un caudal promedio.

$$Q_1 = \frac{V}{t} = \frac{1,62}{9,98} = 0,16232465(l/s)$$

$$Q_2 = \frac{V}{t} = \frac{1,72}{10,62} = 0,16195857(l/s)$$

$$Q_3 = \frac{V}{t} = \frac{1,32}{8,06} = 0,16377171(l/s)$$

Tabla 36. Medición del caudal (Ensayo 9)

Ensayo 9			
Medición del caudal			
#	Volumen (litros)	Tiempo (segundos)	Caudal (l/s)
Q ₁	1,56	9,94	0,15694165
Q ₂	1,1	7,26	0,151515152
Q ₃	1,2	7,66	0,156657963

Fuente: elaboración propia.

$$Q_{prom} = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{3} = \frac{0,15694165 + 0,151515152 + 0,156657963}{3}$$

$$= 0,155038255(l/s) = 9,7302295297(l/m)$$

3.1.9.2 Concentración de sedimentos (Ensayo 9)

Se calculó la concentración del material agregando 15 gramos de material cada 60 segundos:

$$Concentración = \frac{Material\ ingresado * 1000}{Q_{prom}} = \frac{(15 * 1000)}{9,302295297} = 1612,51(mg * l)$$

3.1.9.3 Muestras de sedimentación (Ensayo 9)

Tabla 37. Datos de las muestras (Ensayo 9)

Ensayo 6			
Muestra inicial (gramos)		Muestra final (gramos)	
#1	#2	#3	#4
1,6	1,6	0,4	0,45
Promedio de la muestra inicial (gramos)		Promedio de la muestra final (gramos)	
1,6		0,425	

Fuente: elaboración propia.

Tabla 38. % de remoción de las muestras (Ensayo 9)

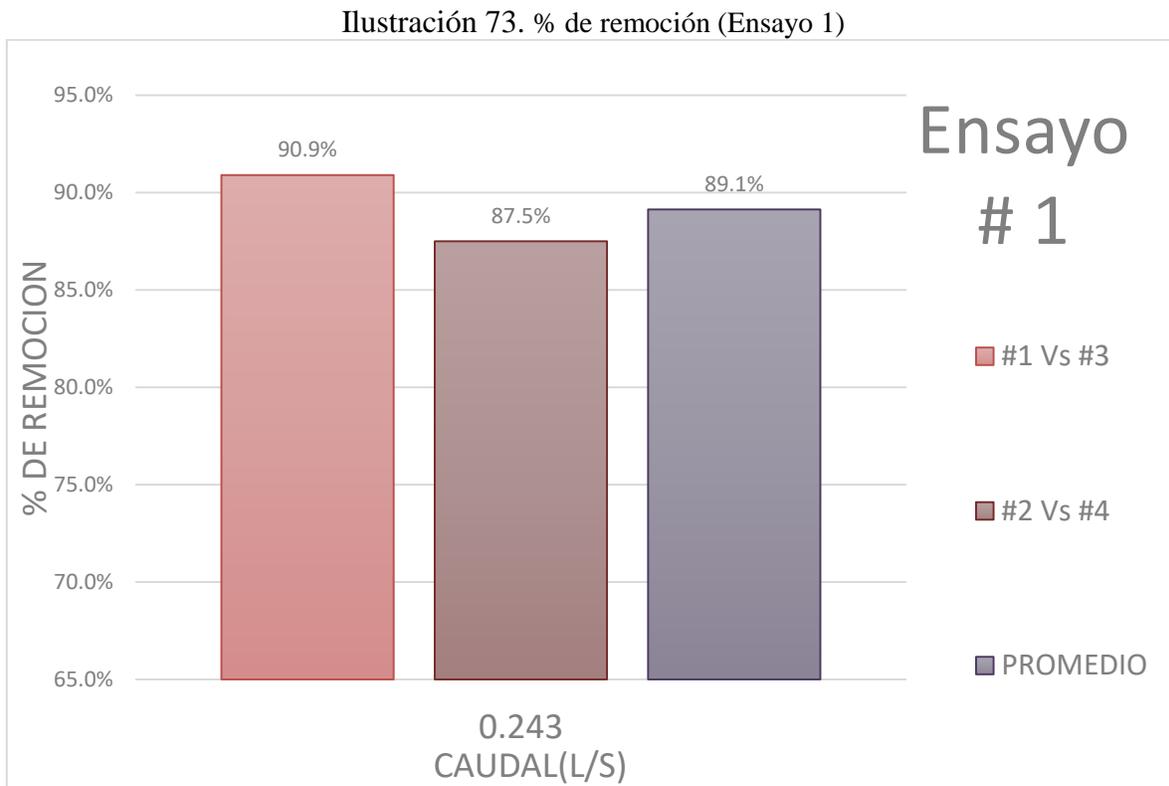
% de remoción		
#1 Vs #3	#2 Vs #4	Prom. inicial vs. Prom. final
75,0%	71,9%	73,4%

Fuente: elaboración propia.

4. Análisis de resultados

4.1 Ensayo 1

Este ensayo se hizo con una pantalla deflectora horizontal con 20 orificios y un caudal promedio de 0,2429 (l/s). Se tomaron dos muestras al inicio y dos al finalizar el ensayo. Se compararon los resultados para hallar el porcentaje de remoción del sistema. Una vez transcurrido el tiempo de retención hidráulica del modelo se compararon las muestras 1 y 2 (tomadas al inicio) con las muestras 3 y 4 (tomadas al final del sistema).



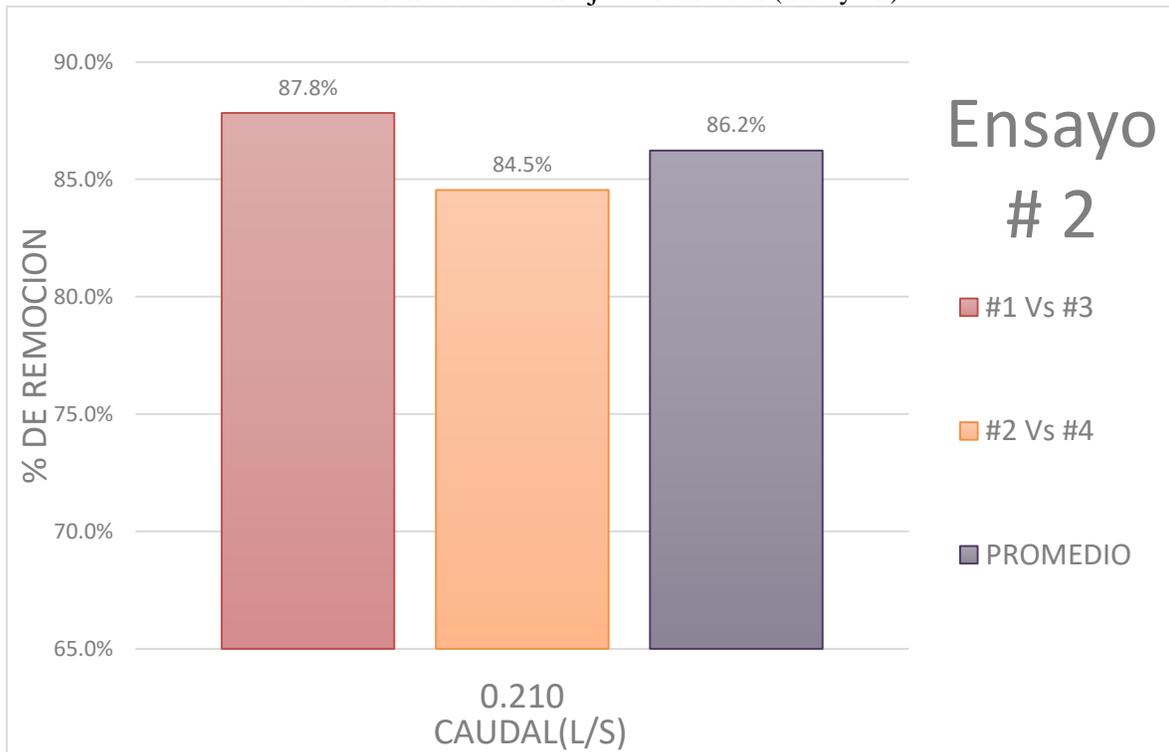
Fuente: elaboración propia.

Según el ensayo de sedimentación, un caudal de 0,243 l/s presenta un porcentaje de remoción entre 87,5 y 90,9%, valores que representan el porcentaje que remueve el desarenador respecto a la entrada y salida, dicho material se acumula en la tolva de lodos.

4.2 Ensayo 2

Esta prueba se realizó utilizando una pantalla deflectora horizontal con 20 orificios y un caudal promedio de 0,210 (l/s). Se tomaron dos muestras al inicio y dos al finalizar el ensayo. Se compararon los resultados para hallar el porcentaje de remoción del sistema. Una vez pasó el tiempo de retención hidráulica del modelo se compararon las muestras 1 y 2 (tomadas al inicio) con las muestras 3 y 4 (tomadas al final del sistema).

Ilustración 74. Porcentaje de remoción (Ensayo 2)



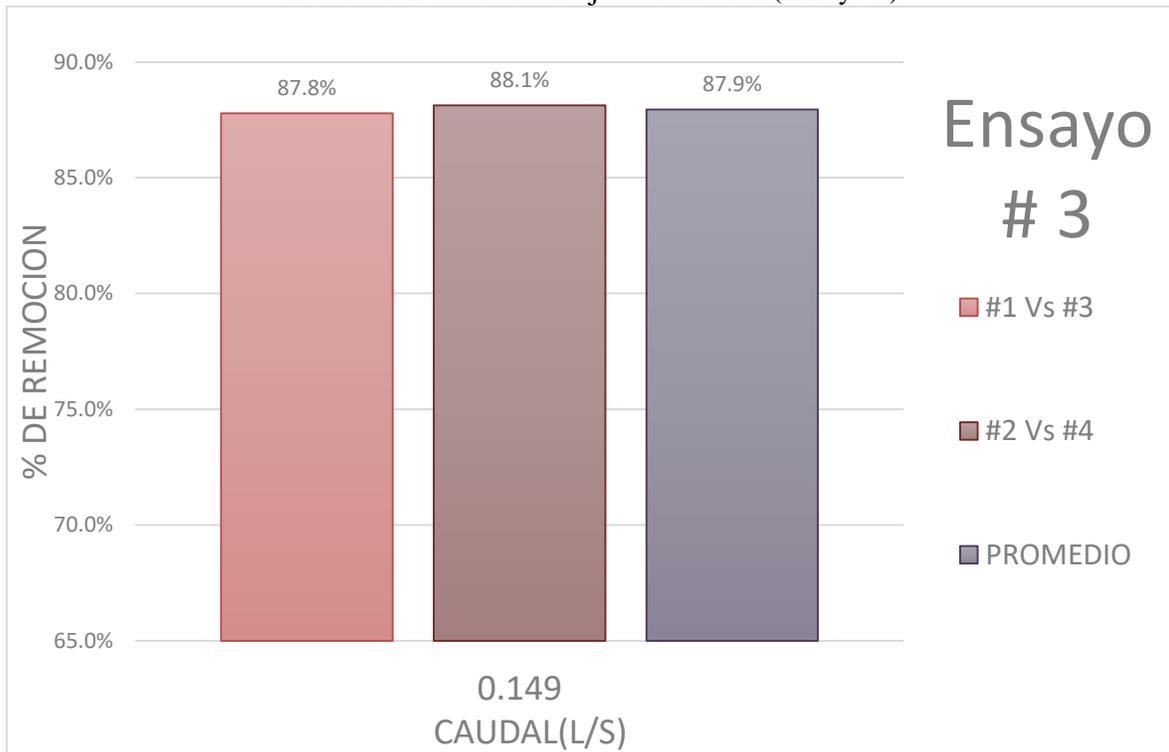
Fuente: elaboración propia.

Según el ensayo de sedimentación, para un caudal de 0,210 l/s se presenta una remoción entre 84,5 y 87,8%. Estos valores representan el porcentaje que remueve el desarenador respecto a la entrada y salida, dicho material se acumula en la tolva de lodos.

4.3 Ensayo 3

Este ensayo se realizó con una pantalla deflectora horizontal con 20 orificios y un caudal promedio de 0,149 (l/s). Se tomaron dos muestras al inicio y dos al finalizar el ensayo. Se compararon los resultados para hallar el porcentaje de remoción del sistema. Una vez transcurrido el tiempo de retención hidráulica del modelo se compararon las muestras 1 y 2 (tomadas al inicio) con las muestras 3 y 4 (tomadas al final del sistema).

Ilustración 75. Porcentaje de remoción (Ensayo 3)



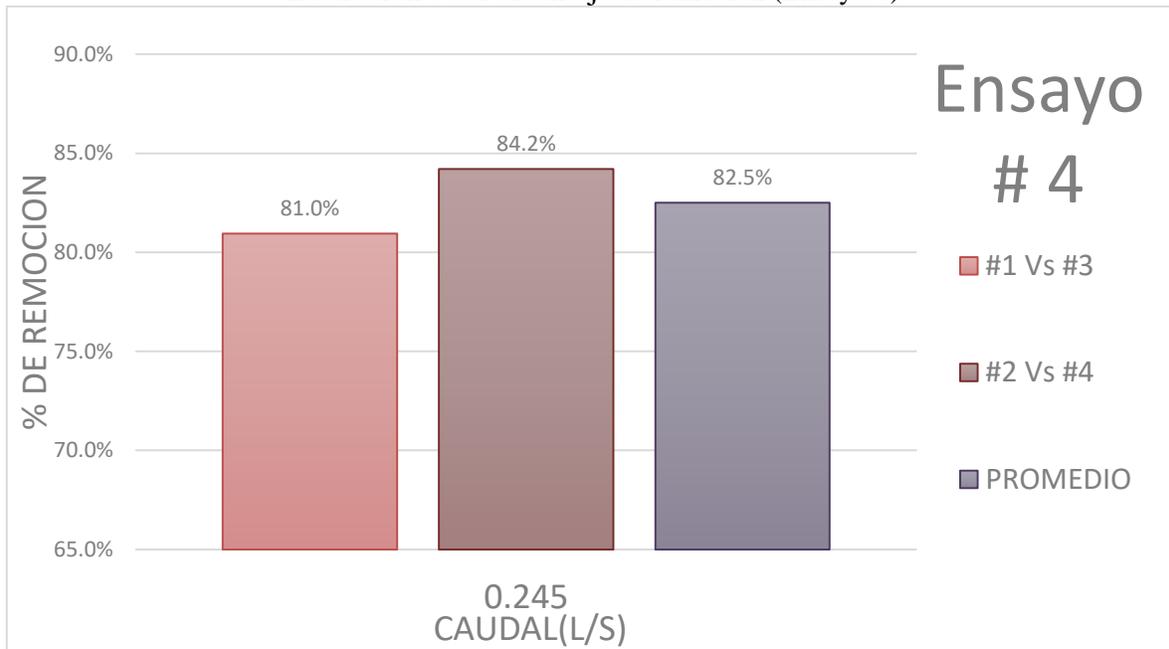
Fuente: elaboración propia.

Según el ensayo de sedimentación, para un caudal de 0,149 l/s se presenta una remoción entre 87,8 y 88,1%, estos valores representan el porcentaje removido por el desarenador respecto a la entrada y salida, dicho material se acumula en la tolva de lodos.

4.4 Ensayo 4

Esta prueba se hizo con una pantalla deflectora vertical con 20 orificios y un caudal promedio de 0,245 (l/s). Se tomaron dos muestras al inicio y dos al finalizar el ensayo. Se compararon los resultados para hallar el porcentaje de remoción del sistema. Cuando se cumplió el tiempo de retención hidráulica del modelo se compararon las muestras 1 y 2 (tomadas al inicio) con las muestras 3 y 4 (tomadas al final del sistema).

Ilustración 76. Porcentaje de remoción (Ensayo 4)



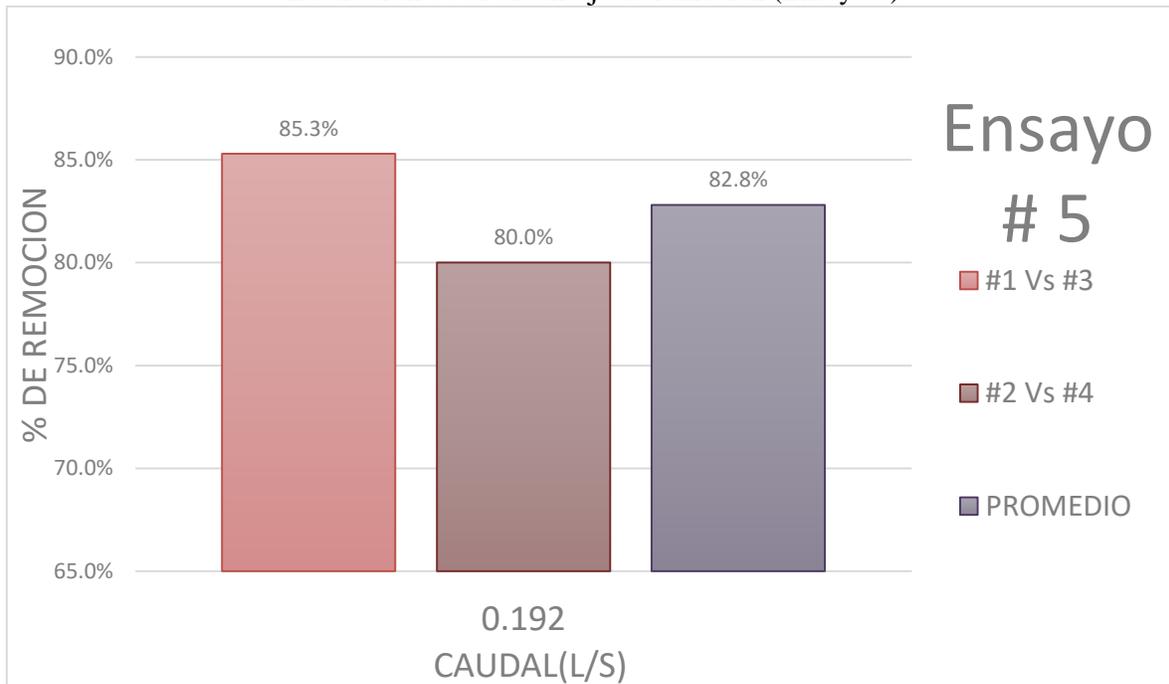
Fuente: elaboración propia.

Según este ensayo, para un caudal de 0,245 l/s se presenta una remoción entre 81,0 y 84,2%. Estos valores representan el porcentaje removido por el desarenador, respecto a la entrada y salida, dicho material se acumula en la tolva de lodos.

4.5 Ensayo 5

El ensayo 5 se hizo con una pantalla deflectora vertical con 20 orificios y un caudal promedio de 0,192 (l/s). Se tomaron dos muestras al inicio y dos al finalizar la prueba. Se compararon los resultados para hallar el porcentaje de remoción del sistema. Una vez transcurrió el tiempo de retención hidráulica del modelo se compararon las muestras 1 y 2 (tomadas al inicio) con las muestras 3 y 4 (tomadas al final del sistema).

Ilustración 77. Porcentaje de remoción (Ensayo 5)



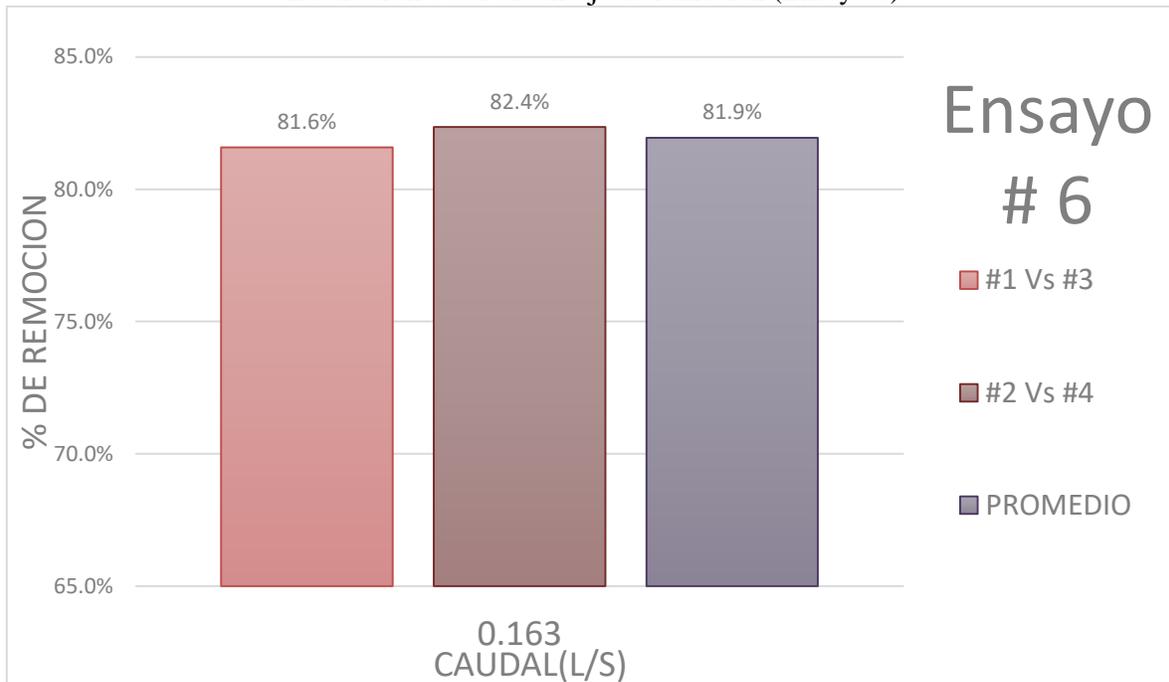
Fuente: elaboración propia.

Según este ensayo de sedimentación, para un caudal de 0,192 l/s se presenta una remoción entre 80,0 y 85,3%. Estos valores representan el porcentaje que remueve el desarenador respecto a la entrada y salida, dicho material se acumula en la tolva de lodos.

4.6 Ensayo 6

Este ensayo se hizo con una pantalla deflectora vertical con 20 orificios y un caudal promedio de 0,163 (l/s). Se tomaron dos muestras al inicio y dos al finalizar el ensayo. Se compararon los resultados para hallar el porcentaje de remoción del sistema. Al terminar el tiempo de retención hidráulica del modelo se compararon las muestras 1 y 2 (tomadas al inicio) con las muestras 3 y 4 (tomadas al final del sistema).

Ilustración 78. Porcentaje de remoción (Ensayo 6)



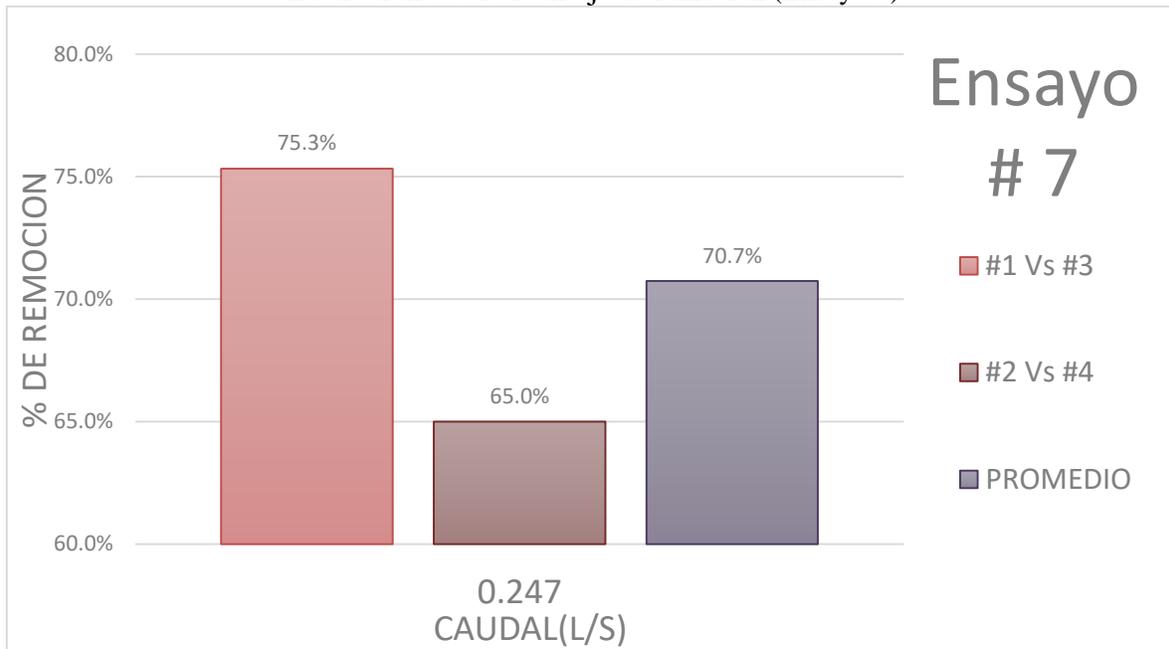
Fuente: elaboración propia.

Según el ensayo de sedimentación, para un caudal de 0,163 l/s se presenta una remoción entre 81,6 y 82,4%. Estos valores representan el porcentaje removido por el desarenador, respecto a la entrada y salida, dicho material se acumula en la tolva de lodos.

4.7 Ensayo 7

Esta prueba se hizo con dos pantallas deflectoras, una horizontal con 11 orificios y una vertical con 9 orificios, y un caudal promedio de 0,247 (l/s). Se tomaron dos muestras al inicio y dos al finalizar el ensayo. Se compararon los resultados para hallar el porcentaje de remoción del sistema. Al finalizar el tiempo de retención hidráulica del modelo se compararon las muestras 1 y 2 (tomadas al inicio) con las muestras 3 y 4 (tomadas al final del sistema).

Ilustración 79. Porcentaje de remoción (Ensayo 7)



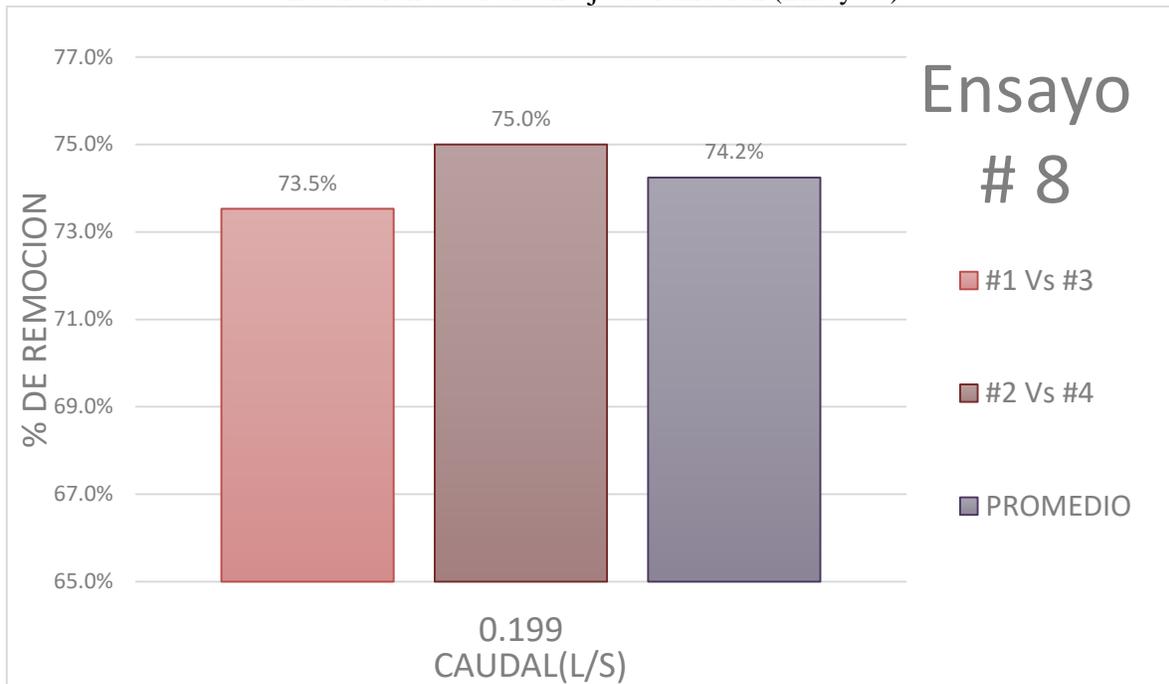
Fuente: elaboración propia.

Según el ensayo de sedimentación, un caudal de 0,247 l/s presenta una remoción entre 65,0 y 75,3%. Estos valores representan el porcentaje que remueve el desarenador, respecto a la entrada y salida, dicho material se acumula en la tolva de lodos.

4.8 Ensayo 8

Este ensayo se realizó con dos pantallas deflectoras, una horizontal con 11 orificios y una vertical con 9 orificios, y un caudal promedio de 0,199 (l/s). Se tomaron dos muestras al inicio y dos al finalizar el ensayo. Se compararon los resultados de las muestras para hallar el porcentaje de remoción del sistema. Una vez transcurrió el tiempo de retención hidráulica del modelo se compararon las muestras 1 y 2 (tomadas al inicio) con las muestras 3 y 4 (tomadas al final del sistema).

Ilustración 80. Porcentaje de remoción (Ensayo 8)



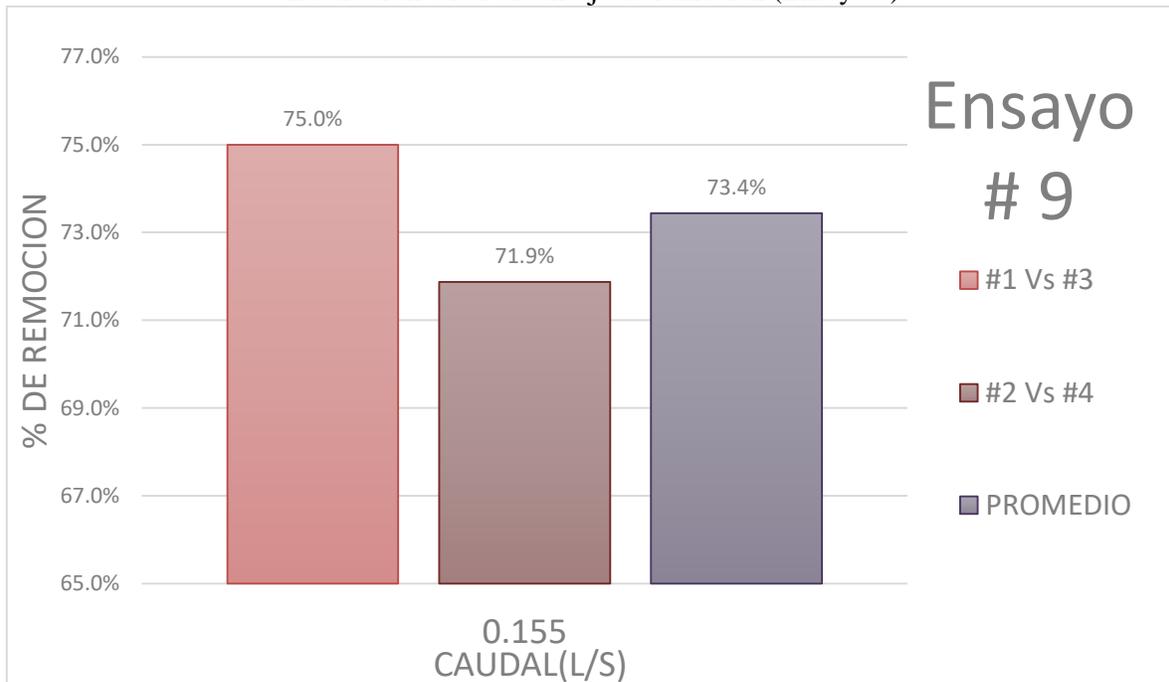
Fuente: elaboración propia.

Según el ensayo de sedimentación, para un caudal de 0,199 l/s se presenta una remoción entre 73,5 y 75,0%. Estos valores representan el porcentaje removido por el desarenador, respecto a la entrada y salida, dicho material se acumula en la tolva de lodos.

4.9 Ensayo 9

El ensayo 9 se hizo con dos pantallas deflectoras, una horizontal con 11 orificios y una vertical con 9 orificios, y un caudal promedio de 0,155 (l/s). Se tomaron dos muestras al inicio y dos al finalizar el ensayo. Se compararon los resultados de las muestras para hallar el porcentaje de remoción del sistema. Cuando terminó el tiempo de retención hidráulica del modelo se compararon las muestras 1 y 2 (tomadas al inicio) con las muestras 3 y 4 (tomadas al final del sistema).

Ilustración 81. Porcentaje de remoción (Ensayo 9)



Fuente: elaboración propia.

Según el ensayo de sedimentación, un caudal de 0,155 l/s presenta una remoción entre 71,9 y 75,0%. Estos valores representan el porcentaje que remueve el desarenador, respecto a la entrada y salida, dicho material se acumula en la tolva de lodos.

4.10 Análisis de resultados. Número de Hazen (diseño)

De acuerdo con los datos de diseños, el número de Hazen se calculó para caudales de 0,00025 m/s o 0,25 l/s, de la siguiente forma:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0}$$

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$\begin{aligned} V_s &= \frac{g}{18} * \frac{(\rho_s - \rho)}{\mu} * d^2 = \frac{9,806}{18} * \frac{(1,7 - 0,9991)}{0,000001146} * \left(\frac{0,05}{1000}\right)^2 \\ &= 0,000832973(\text{m/s}) \text{ o } 0,0832973(\text{cm/s}) \end{aligned}$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$\begin{aligned} V_0 &= \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,00025}{\frac{0,527328125}{0,7}} = \\ &= 0,000331861685(\text{m/s}) \text{ o } 0,0331861685(\text{cm/s}) \end{aligned}$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,000331861685} = 2,51$$

4.11 Análisis de resultados. Número de Hazen (ensayos)

Para cada ensayo se calculó el número de Hazen, la velocidad de sedimentación efectiva (V_s) no varió, debido a que se utilizó el mismo material en todos los ensayos. Por otra parte, el volumen y la

altura (H) se mantuvieron constantes porque son las dimensiones con las que se construyó el modelo hidráulico. El parámetro que varió fue el caudal que se implementó en el modelo hidráulico.

4.11.1 Cálculo del número de Hazen (ensayo 1)

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$V_s = 0,000832973(\text{m/s})$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$V_0 = \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,0002429}{\frac{0,527328125}{0,7}} = 0,0003224(\text{m/s})$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,0003224} = 2,58$$

4.11.2 Cálculo del número de Hazen (ensayo 2)

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$V_s = 0,000832973(\text{m/s})$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$V_0 = \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,0002102}{\frac{0,527328125}{0,7}} = 0,0002791(\text{m/s})$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,0002791} = 2,98$$

4.11.3 Cálculo del número de Hazen (ensayo 3)

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$V_s = 0,000832973(\text{m/s})$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$V_0 = \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,0001485}{\frac{0,527328125}{0,7}} = 0,0001972(\text{m/s})$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,0001972} = 4,22$$

4.11.4 Cálculo del número de Hazen (ensayo 4)

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$V_s = 0,000832973(\text{m/s})$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$V_0 = \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,0002451}{\frac{0,527328125}{0,7}} = 0,0003254(\text{m/s})$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,0003254} = 2,56$$

4.11.5 Cálculo del número de Hazen (ensayo 5)

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$V_s = 0,000832973(\text{m/s})$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$V_0 = \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,0001923}{\frac{0,527328125}{0,7}} = 0,0002553(\text{m/s})$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,0002553} = 3,26$$

4.11.6 Cálculo del número de Hazen (ensayo 6)

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$V_s = 0,000832973(\text{m/s})$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$V_0 = \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,0001627}{\frac{0,527328125}{0,7}} = 0,0002160(\text{m/s})$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,0002160} = 3,86$$

4.11.7 Cálculo del número de Hazen (ensayo 7)

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$V_s = 0,000832973(\text{m/s})$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$V_0 = \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,0002466}{\frac{0,527328125}{0,7}} = 0,0003273(\text{m/s})$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,0003273} = 2,54$$

4.11.8 Cálculo del número de Hazen (ensayo 8)

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$V_s = 0,000832973(\text{m/s})$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$V_0 = \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,0001992}{\frac{0,527328125}{0,7}} = 0,0002644(\text{m/s})$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,0002644} = 3,15$$

4.11.9 Cálculo del número de Hazen (ensayo 9)

Velocidad de sedimentación efectiva:

$$V_s = 0,000832973(\text{m/s})$$

Velocidad de sedimentación teórica:

$$V_0 = \frac{Q}{\frac{\text{Volumen}}{H}} = \frac{0,0001550}{\frac{0,527328125}{0,7}} = 0,0002058(\text{m/s})$$

Número de Hazen:

$$\text{Número de Hazen} = \frac{V_s}{V_0} = \frac{0,000832973}{0,0002058} = 4,05$$

Tabla 39. Resultados, porcentaje de remoción y número de Hazen

Tipo de pantalla	Ensayo #	Caudal utilizado (l/s)	Porcentaje de remoción	Número de Hazen
Horizontal	1	0,2429	89,1	2,58
	2	0,2102	86,2	2,98
	3	0,1485	87,9	4,22
Vertical	4	0,2451	82,5	2,56
	5	0,1923	82,8	3,26
	6	0,1627	81,9	3,86
Horizontal y vertical	7	0,2466	70,7	2,54
	8	0,1992	74,2	3,15
	9	0,1550	73,4	4,05

Fuente: elaboración propia.

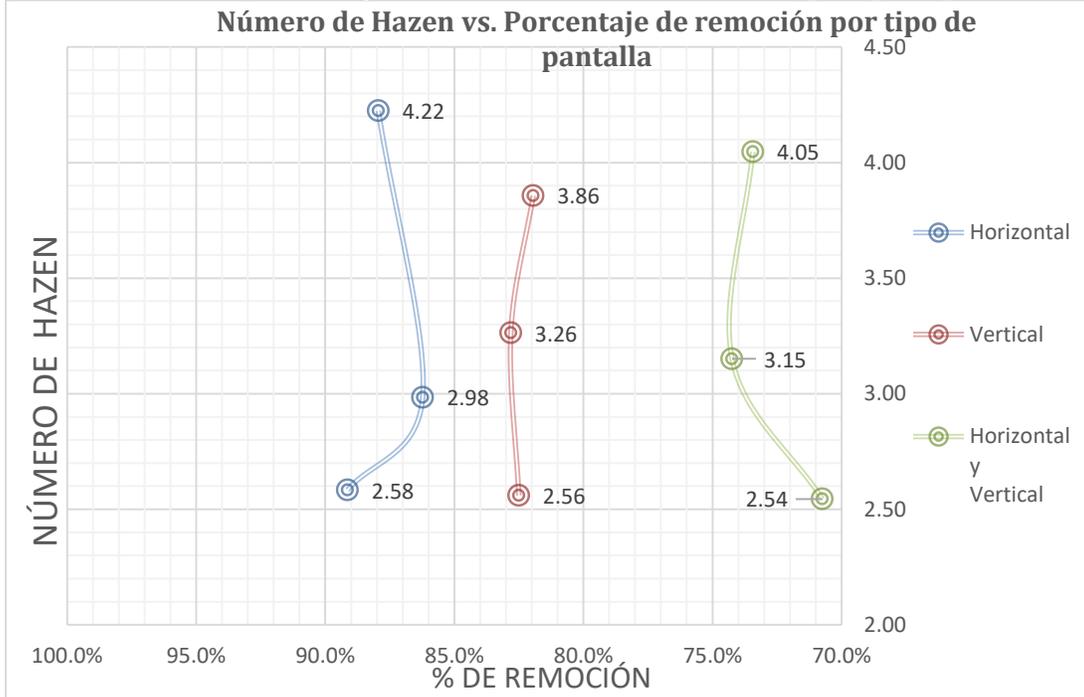
De acuerdo con las recomendaciones y normas pertinentes, el tiempo de retención hidráulico debe estar en un rango entre 0,5 y 4 horas. Así mismo, el caudal máximo que se puede tratar con las dimensiones establecidas y construidas debe ser de 0,2929 l/s.

El caudal unitario debe encontrarse entre 15 y 80 m³/m²/día. Por su parte, el caudal mínimo que se puede tratar con las dimensiones establecidas y construidas debe ser de 0,1308 l/s

Al evaluar el modelo hidráulico los ensayos se deben realizar en un rango de caudal entre 0,1308 y 0,2929 l/s.

Para el volumen implementado con un caudal máximo de 0,2929 l/s el número de Hazen es 2,14 y con un caudal mínimo de 0,1308 l/s el número de Hazen es 4,80.

Ilustración 82. Porcentaje de remoción vs. Número de Hazen por tipo de pantalla



Fuente: elaboración propia.

Los cálculos de tiempo de retención hidráulico y de caudal unitario para los caudales utilizados en los ensayos se realizaron teniendo en cuenta de no sobrepasar los rangos establecidos en la norma (tabla 40).

Tabla 40. Tiempo de retención hidráulico y caudal unitario

Volumen V - (m ³)		0,52733				
Altura del desarenador (m)		0,7				
Tipo de pantalla	Ensayo #	Caudal utilizado (l/s)	Porcentaje de remoción	Tiempo de retención hidráulica (Hr) (Θ)	Caudal unitario (qi) (m ³ /m ² /día)	Número de Hazen
Horizontal	1	0,2429	89,1	0,60303	27,85915	2,58
	2	0,2102	86,2	0,69673	24,11274	2,98
	3	0,1485	87,9	0,98616	17,03577	4,22
Vertical	4	0,2451	82,5	0,59753	28,11597	2,56
	5	0,1923	82,8	0,76167	22,05678	3,26
	6	0,1627	81,9	0,90039	18,65857	3,86
Horizontal y vertical	7	0,2466	70,7	0,59404	28,28093	2,54
	8	0,1992	74,2	0,73547	22,84252	3,15
	9	0,1550	73,4	0,94480	17,78155	4,05

Fuente: elaboración propia.

Se verificó que los caudales utilizados en los ensayos se encontraran en los rangos establecidos.

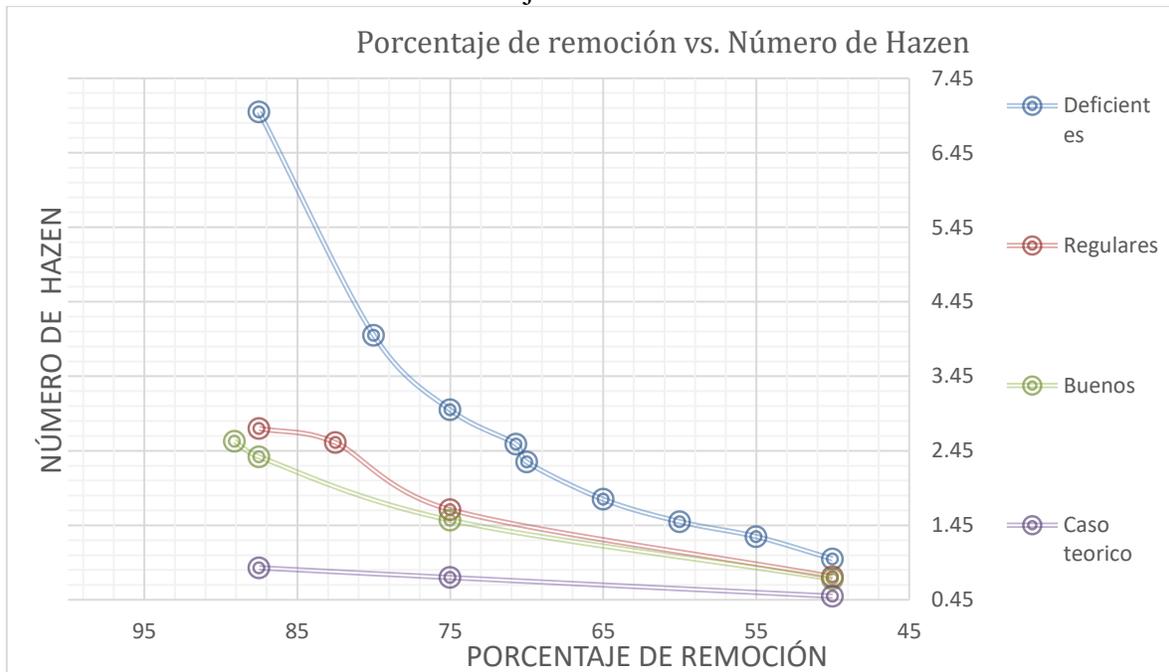
Con base en los resultados de los ensayos, los porcentajes de remoción promedio para cada tipo de pantalla deflectora se ingresaron en la tabla de Hazen para completar los porcentajes faltantes.

Tabla 41. Tabla de coeficiente de Hazen agregando tres valores obtenidos

Tipo de deflector	Porcentaje de remoción										
	89,1	87,5	82,5	80	75	70,7	70	65	60	55	50
Deficientes		7,00		4,00	3,00	2,54	2,30	1,80	1,50	1,30	1,00
Regulares		2,75	2,56		1,66						0,76
Buenos	2,58	2,37			1,52						0,73
Caso teórico		0,88			0,75						0,50

Fuente: elaboración propia.

Ilustración 83. Porcentaje de remoción vs. Número de Hazen



Fuente: elaboración propia.

De acuerdo con los resultados de los ensayos, se ingresaron los números de Hazen para los tres tipos de deflectores: los deflectores buenos corresponden a la pantalla horizontal, los regulares a la pantalla vertical y los deflectores deficientes a las pantallas ubicadas horizontal y verticalmente.

5. Conclusiones

Se diseñó un desarenador para remover partículas de 0,05 mm, con una remoción del 90% y un número de Hazen de 2,51. A partir de ese diseño se construyó un modelo físico para realizar ensayos en el laboratorio. Se probó el comportamiento hidráulico del modelo con las tres opciones de pantallas deflectoras. Mediante la medición de las concentraciones inicial y final de sólidos se determinaron los porcentajes de remoción de sedimentos.

Con base en los resultados de los ensayos, se presentan las siguientes conclusiones sobre la influencia de las pantallas deflectoras en el porcentaje de remoción de sedimento en el desarenador.

- La eficiencia en la remoción de partículas en la estructura de desarenado está íntimamente ligada a la forma de las pantallas deflectoras, ya que la ubicación y la disposición de estas, orienta el flujo y la dirección de movimiento de la partícula sólidas.
- La eficiencia de remoción esperada en una estructura de desarenación oscila entre el 70 y 90%; por esta razón, el modelo hidráulico se evaluó en este rango.
- Al ubicar todos los orificios de la pantalla deflector en la placa horizontal se presenta la mejor eficiencia de remoción, la cual varía entre 86,2 y 89,1%.
- Al ubicar todos los orificios de la pantalla deflector en la placa vertical se presenta la eficiencia de remoción, que varía entre 81,9 y 82,8%.
- Al ubicar los orificios en la palca horizontal con 11 orificios y otra placa vertical con 9 orificios, la eficiencia de remoción esperada se reduce drásticamente, dando valores entre 70,7 y 74,2%.
- La pantalla deflector más eficiente se obtiene cuando los orificios se ubican de forma horizontal, lo cual obliga al flujo a ingresar a la zona de sedimentación en dirección descendente, ocasionando una rápida expansión de las líneas de corriente en la primera parte de la zona de sedimentación, esto al parecer contribuye a mejorar la eficiencia de la estructura.

- Cuando se combinan orificios en posición vertical y horizontal, la pantalla deflectora presenta un menor porcentaje de remoción.
- Porcentajes de remoción menores al 70% indican que la estructura es poco eficiente en su desempeño.
- Se aportaron tres valores nuevos para porcentajes no contemplados en la tabla de Diseño.

Este trabajo de grado cumplió con el objetivo de diseñar un modelo a escala de un desarenador para medir la eficiencia y capacidad de la estructura para remover sedimentos con tres tipos de pantallas deflectoras y su incidencia en el buen comportamiento hidráulico en la zona de sedimentación, que se refleja en un buen o mal desarenado.

6. Referencias bibliográficas

- Arboleda, J. (2000). *Teoría y práctica de la purificación del agua*, tomo 1, Colombia, Editorial Acodal.
- Cengel, Y. & Cimbala, J. (2006). *Mecánica de fluidos. Fundamentos y aplicaciones*. México D.F: McGraw-Hill/Inter América Editores S.A.
- Corcho, F. & Duque, J. (2009). *Acueductos: teoría y diseño*. Medellín, Universidad de Medellín.
- Escuela Colombiana de Ingeniería (2018). Tarifas de laboratorios. Recuperado de <https://www.escuelaing.edu.co/es/laboratorios?lab=> el 6 de mayo de 2019.
- Matamoros, H. (2017). Presentación Clase 4 “Acueductos desarenador”. Bogotá D.C: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Económico (2000). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2000: Resolución 1096.
- Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio (2017). Reglamento técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS-2017: Resolución 0330.
- López Cualla, R. (2003). *Elementos de diseño para acueductos y alcantarillados* (2ª ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Romero, J. (2006). *Purificación del agua* (2ª ed.). Bogotá: Editorial Escuela Colombiana de Ingeniería.