

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE SEDIMENTACIÓN
PARA LA EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN Y
EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE**



IRNE ALEJANDRO MANRIQUE PRIETO

504136

JHON MARCOS GOMEZ CHAVES

504096

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2016

**DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA TORRE DE SEDIMENTACIÓN
PARA LA EVALUACIÓN DE LOS PROCESOS DE REMOCIÓN Y
EFICIENCIA EN EL TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE**

IRNE ALEJANDRO MANRIQUE PRIETO

504136

JHON MARCOS GOMEZ CHAVES

504096

Trabajo de Grado para optar al título de Ingeniero Civil

UNIVERSIDAD CATÓLICA DE COLOMBIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL

BOGOTÁ

2016



Atribución-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-ND 2.5 CO)

This is a human-readable summary of (and not a substitute for) the [license](#).

[Advertencia](#)

Usted es libre para:



Compartir — copiar y redistribuir el material en cualquier medio o formato

Para cualquier propósito, incluso comercialmente

El licenciante no puede revocar estas libertades en tanto usted siga los términos de la licencia

Bajo los siguientes términos:



Atribución — Usted debe darle crédito a esta obra de manera adecuada, proporcionando un enlace a la licencia, e indicando si se han realizado cambios. Puede hacerlo en cualquier forma razonable, pero no de forma tal que sugiera que usted o su uso tienen el apoyo del licenciante.



Sin Derivar — Si usted mezcla, transforma o crea nuevo material a partir de esta obra, usted no podrá distribuir el material modificado.

No hay restricciones adicionales — Usted no puede aplicar términos legales ni medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros hacer cualquier uso permitido por la licencia.

Aviso:

Usted no tiene que cumplir con la licencia para los materiales en el dominio público o cuando su uso esté permitido por una excepción o limitación aplicable.

No se entregan garantías. La licencia podría no entregarle todos los permisos que necesita para el uso que tenga previsto. Por ejemplo, otros derechos como relativos a publicidad, privacidad, o derechos morales pueden limitar la forma en que utilice el material.

Nota de aceptación

Firma del presidente del Jurado

Firma del Jurado

Firma del Jurado

Bogotá, noviembre, 2016

Le agradecemos a Dios por habernos acompañado formado y guiado a lo largo de nuestro proceso de formación en la academia.

Le damos gracias a nuestro tutor, Ing. Felipe Santamaría por su esfuerzo y dedicación, quien con sus conocimientos, su experiencia, su paciencia y su motivación que nos ayudó, en cada momento dándonos la oportunidad de crecer profesionalmente.

A la Ingeniera Paula A. Villegas y Al Ingeniero Mauricio González, que quienes con sus saberes y disposiciones nos ayudaron con una formación complementaria para el buen desarrollo del proyecto

Agradecemos a nuestras familias, que nos dieron el apoyo durante este arduo proceso de formación y que nos acompañaron en cada etapa de formación como estudiantes y personas

A nuestros compañeros y amigos que nos ayudaron a confiar y a creer en nosotros y haber hecho de nuestra etapa universitaria haya sido un trayecto de vivencia que nunca olvidaremos.

Al personal de laboratorios de la universidad, quienes nos ayudaron en la guianza y desarrollo del proyecto.

Son muchas personas que han formado parte de nuestras vidas profesionales a las que nos gustaría agradecerles su amistad consejos apoyos y compañía.

Para ellos: muchas gracias y que Dios los bendiga.

Alejandro Manrique P.
Jhon Marcos Gómez

CONTENIDO

LISTA DE ANEXOS	15
RESUMEN	18
INTRODUCCION	19
1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION	20
2. OBJETIVOS.....	21
2.1. GENERAL.....	21
2.2. ESPECIFICOS.....	21
3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA.....	22
4. FUNDAMENTO TEORICO	23
4.1. CONCEPTO GENERAL	23
4.2. SEDIMENTACION DE PARTICULAS DISCRETAS.....	26
4.2.1. EXPRESIONES DE VELOCIDAD PARA PARTICULAS DISCRETAS	27
4.3. SEDIMENTACION DE PARTICULAS FLOCULENTAS.	30
4.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE SEDIMENTACION.....	31
4.5.1. CALIDAD DEL AGUA	31
4.5.2. CONDICIONES HIDRAULICAS.	31
4.5.3. FACTORES EXTERNOS	32
4.6. TEORIA COLUMNAS DE SEDIMENTACION.	32
4.6.1. ENSAYOS PARA DETERMINAR LA EFICIENCIA.....	34
5. ESTADO DEL ARTE SOBRE PROCESOS DE SEDIMENTACION.....	36
5.1. UTILIZACIÓN DEL PARÁMETRO “EFICIENCIA” EN REMOCIÓN DE TURBIEDAD EN SEDIMENTADORES.	36

5.2. EFECTO DEL INCREMENTO EN LA TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA SOBRE LA EFICIENCIA DE PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN.....	37
5.3. EVALUACION DE DOS CASOS DE ESTUDIO DEL FENOMENO DE SEDIMENTACION EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA.....	39
5.4. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS.....	40
5.5. COMPORTAMIENTO DE LA SEDIMENTACIÓN EN UN SISTEMA DE MICROPARTÍCULAS	41
5.6. SEDVEL: UN BALANCE BAJO EL AGUA PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN IN SITU Y SUSPENSIÓN DE SEDIMENTOS COHESIVOS CONCENTRADOS	43
5.7. REMOCIÓN DE TURBIEDAD EN AGUA DE UNA FUENTE NATURAL MEDIANTECOAGULACIÓN/FLOCULACIÓN USANDO ALMIDÓN DE PLÁTANO.....	44
6. DISEÑO GENERAL DEL PROTOTIPO.....	46
6.1. APLICACIÓN DEL PROTOTIPO.....	47
6.2. DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO.....	47
6.3. DIMENSIONAMIENTO DE EL PROTOTIPO.....	48
6.3.1. ESTRUCTURA.....	48
6.3.2. BRIDA	50
6.3.3. ANILLO DE AIRE.....	51
6.4. CARACTERISTICAS FISICAS Y MATERIALES	52
6.4.1. CALCULO DE PROPIEDADES FISICAS.....	52
6.5. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA ESTRUCTURA.....	57
6.6. SELECCIÓN DE LOS REGISTROS PARA TOMA DE MUESTRAS.....	59
6.7. SELECCIÓN DE EMPAQUES Y PASES PARA BRIDAS.....	60

6.8. SELECCIÓN DE MANGUERA Y VALVULA REDUCTURA PARA AIRE.....	62
6.9. SELECCIÓN DE MUESTRAS PROBLEMA	63
7. MONTAJE DE LA TORRE Ó COLUMNA DE SEDIMENTACIÓN	65
8. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTOTIPO	68
8.1. LABORATORIO DE DENSIDAD ESPECÍFICA	68
8.2. EVALUACION DE SEDIMENTACION	72
8.2.1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.....	72
8.3. SEDIMENTACION TIPO I.....	76
8.3.1. PRUEBA NO. 1 PARA TAMIZ #100	77
8.3.2. PRUEBA NO. 2 PARA TAMIZ #100	83
8.3.3. PRUEBA NO. 1 PARA TAMIZ #200.....	88
8.3.4. PRUEBA NO. 2 PARA TAMIZ #200.....	94
8.3.5.PRUEBA NO. 1 PARA PASA TAMIZ #200.	99
3.5.6. PRUEBA NO. 2 PARA PASA TAMIZ #200	105
8.4. SEDIMENTACION TIPO II.....	111
8.4.1. PRUEBA PARA TAMIZ #100	111
8.4.2. PRUEBA PARA TAMIZ #200	114
8.4.3. PRUEBA PARA PASA TAMIZ #200.....	115
9. ANALISIS DE RESULTADOS	119
10. CONCLUSIONES	121
11. RECOMENDACIONES.....	123
12. BIBLIOGRAFÍA.....	124

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Turbiedad.....	23
Figura 2. Velocidad de caída de una partícula crítica	27
Figura 3. Fuerzas actuantes en una partícula.	27
Figura 4. Índices de Willcomb para determinar el tamaño del flóculo	30
Figura 5. Corrientes térmicas debidas al agua caliente.....	31
Figura 6. Columna de sedimentación.	35
Figura 7. Diseño concurrente del prototipo	47
Figura 8. Parámetros de diseño de una columna de sedimentación.....	48
Figura 9. Bosquejo general de la estructura	49
Figura 10. Detalle de Brida para prototipo	50
Figura 11. Vista isométrica Para el elemento 1	50
Figura 12. Detalle Anillo	51
Figura 13. Anillo dentro del dispositivo	51
Figura 14. Anillo de la estructura.	51
Figura 15. Detalle entrada de aire	51
Figura 16. Distribución de fuerzas en superficies	54
Figura 17. Distribución de presión hidrostática en la pared de la estructura.	56
Figura 18. Distribución de fuerzas en el fondo de la estructura	56
Figura 19. Láminas de acrílico en varios calibres.....	58
Figura 20. Válvulas de bola para prototipo.	59
Figura 21. Peso Válvula en balanza.....	60
Figura 22. Peso de adaptador macho.....	60
Figura 23. Empaque de caucho para brida.....	61
Figura 24. Tornillos Bristol Inoxidables.....	62
Figura 25. Manguera de paso de aire.....	62
Figura 26. Válvula de cobre para paso de aire.....	62
Figura 27. Secado de muestra.....	63
Figura 28. Tamices #100, #200 y fondo	63
Figura 29. Muestras de arena con diferentes diámetros	64
Figura 30. Empaque y adaptador macho	65
Figura 31. Unión de válvula a la estructura.....	65
Figura 32. Ensamble Anillo de Aire	66
Figura 33. Ajuste de Caucho para brida.....	66
Figura 34. Elementos verificados	66
Figura 35. Detalle atornillado.....	66
Figura 36. Prueba de estanqueidad	67
Figura 37. Llenado y aireación	67

Figura 38. Figura tal. Calibración del picnómetro	68
Figura 39. Baño maría de muestra a 25°C.	69
Figura 40. Recipientes para muestras.....	73
Figura 41. Llenado de la estructura a 1m.....	73
Figura 42. Llenado total del prototipo.	74
Figura 43. Diluyendo Muestra en el prototipo.....	74
Figura 44. Toma de registro de temperatura	74
Figura 45. Muestreo para Evaluar	74
Figura 46. Lectura del turbidímetro.	75
Figura 47. Columna de sedimentación sin muestra	75
Figura 48. Columna de sedimentación 5 min. De ensayo	75
Figura 49. Columna de sedimentación después del ensayo	76
Figura 50. Fondo con lodos	76
Figura 51. Curva Integral para el análisis de fracción total de partículas removidas	78

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Velocidad de sedimentación según el tamaño de la partícula.	24
Tabla 2. Valores de coeficientes de arrastre.	29
Tabla 3. Matriz Coeficientes de correlación de Spearman Para turbiedad máxima y dosis de coagulante y cloro (precloración y post-cloración) en eventos de alta turbiedad.....	38
Tabla 4. Presiones en cada uno de los puntos a evaluar.....	55
Tabla 5. Resistencia al Impacto de Lámina de acrílico comparada con la de vidrio de diferentes tipos.	57
Tabla 7. Propiedades Físicas del Caucho.	61
Tabla 8. Turbiedad para determinación de concentración.	64
Tabla 9. Calibración de picnómetro.....	69
Tabla 10. Densidad de agua y coeficiente de corrección por temperatura ..	72
Tabla 11. Parámetros iniciales para prueba 1, para tamiz #100.....	77
Tabla 12. Resumen de iteraciones para velocidad de sedimentación Prueba No. 1, Tamiz #100.....	77
Tabla 13. Datos experimentales prueba No. 1 con tamiz #100, a una altura de 50 cm.....	78
Tabla 14. Datos experimentales prueba No. 1 con tamiz #100, a una altura de 100 cm.....	80
Tabla 15. Datos experimentales prueba No. 1 con tamiz #100, a una altura de 150 cm.....	81
Tabla 16. Parámetros iniciales para prueba No 2, tamiz #100.....	83
Tabla 17. Resumen de iteraciones para velocidad de sedimentación. Prueba No. 2, tamiz #100.....	84
Tabla 18. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #100, a una altura de 50 cm.....	84
Tabla 19. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #100, a una altura de 100 cm.	86
Tabla 20. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #100, a una altura de 150 cm.	87
Tabla 21. Parámetros iniciales para prueba No 1, tamiz #200.....	89
Tabla 22. Datos experimentales prueba No. 1 con tamiz #200, a una altura de 50 cm.	90
Tabla 23. Datos experimentales prueba No.1 con tamiz #200, a una altura de 100 cm.	91

Tabla 24. Datos experimentales prueba No.1 con tamiz #200, a una altura de 150 cm.....	93
Tabla 25. Parámetros iniciales para prueba No. 2, tamiz #200.....	95
Tabla 26. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #200, a una altura de 50 cm.....	96
Tabla 27. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #200, a una altura 100 cm.....	97
Tabla 28. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #200, a una altura de 150 cm.	98
Tabla 29. Parámetros iniciales para prueba No. 1, pasa tamiz #200	100
Tabla 30. Datos experimentales prueba No.1 con pasa tamiz #200, a una altura de 50cm.	101
Tabla 31. Datos experimentales prueba No.1 con pasa tamiz #200, a una altura de 100 cm.....	102
Tabla 32. Datos experimentales prueba No.1 con pasa tamiz #200, a una altura de 150 cm.....	103
Tabla 33. Parámetros iniciales para prueba No. 2, pasa tamiz #200	105
Tabla 34. Datos experimentales prueba No. 2 con pasa tamiz #200, a una altura de 50 cm.	106
Tabla 35. Datos experimentales prueba No.2 con pasa tamiz #200, a una altura de 100 cm.....	107
Tabla 36. Datos experimentales prueba No.2 con pasa tamiz #200, a una altura de 150 cm.....	109
Tabla 37. Resumen de las remociones totales de todos los tamices y alturas	110
Tabla 38. Turbiedades experimentales para tamiz #100.....	111
Tabla 39. Remociones porcentuales para tamiz #100.....	112
Tabla 40. Remoción total del sistema de partículas floculentas para tamiz #100.....	113
Tabla 41. Turbiedades experimentales para tamiz #200.....	114
Tabla 42. Remociones porcentuales para tamiz #200	114
Tabla 43. Remoción total del sistema de partículas floculentas para tamiz #200.....	115
Tabla 44. Turbiedades experimentales para pasa tamiz #200.....	116
Tabla 45. Remociones porcentuales para pasa tamiz #200	116
Tabla 46. Remoción total del sistema de partículas floculentas para tamiz pasa #200.....	117

LISTA DE GRAFICAS

Grafica 1. Tipos de Sedimentación.	25
Grafica 2. Análisis de la curva decantación interferida.	33
Grafica 3. Calibración de picnómetro.	70
Grafica 4. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 100 y h=50 cm.	79
Grafica 5. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 100 y h=100 cm.	81
Grafica 6. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 100 y h=150 cm.	82
Grafica 7. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 100 y h=50 cm.	85
Grafica 8. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 100 y h=100 cm.	86
Grafica 9. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 100 y h=150 cm.	88
Grafica 10. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 200 y h=50 cm.	91
Grafica 11. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 200 y h=100 cm.	92
Grafica 12. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 200 y h=150 cm.	94
Grafica 13. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 200 y h=50 cm.	96
Grafica 14. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 200 y h=100 cm.	98
Grafica 15. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 200 y h=150 cm.	99
Grafica 16. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, pasa tamiz # 200 y h=50 cm.	101
Grafica 17. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, pasa tamiz # 200 y h=100 cm.	103
Grafica 18. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, pasa tamiz # 200 y h=150 cm.	104
Grafica 19. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, pasa tamiz # 200 y h=50 cm.	107
Grafica 20. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, pasa tamiz # 200 y h=100 cm.	108

Grafica 21. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, pasa tamiz # 200 y h=150 cm. 109

Grafica 22. Grafico general para remoción de partículas floculentas, tamiz #100..... 112

Grafica 23. Grafico general para remoción de partículas floculentas, tamiz #100..... 115

Grafica 24. Grafico general para remoción de partículas floculentas, pasa tamiz #200 117

LISTA DE ANEXOS

<i>ANEXO A</i>	127
----------------------	-----

GLOSARIO

La mayoría de Conceptos usados en esta investigación son aplicados al estudio hidráulico del prototipo, como también de las condiciones de un sedimentador ideal.

Coagulación-floculación: “Se llama Coagulación-Floculación al proceso por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas floc.” (ARBOLEDA Valencia, 2000)

Carga Superficial: “la carga superficial no es sino la velocidad crítica mínima de sedimentación Q/A , que se espera que en promedio tengan un cierto porcentaje (70-98%) de partículas de la suspensión” (ARBOLEDA Valencia, 2000)

Calidad del agua cruda (si predomina el color o la turbiedad), peso y grado de hidratación del floc, Forma y tipo de sedimentador que se adopte, Cuidado en el control del proceso, coagulantes que se usen., grado de eficiencia.

Columna de Sedimentación: La sedimentación es una operación usada para el tratamiento de agua tanto residual como potable. Los parámetros de diseño de dichas estructuras se obtienen bajo ensayos realizados en columnas de sedimentación considerando aproximaciones teóricas. Las columnas de sedimentación usadas en estos ensayos varían de dimensiones dependiendo su función del tipo de análisis requerido (VILLACRECES, 2009)

Periodo de detención: “es el tiempo máximo que la partícula con la mínima velocidad de sedimentación escogida, tarda en llegar al fondo. Por tanto, es directamente dependiente de la profundidad del tanque. Cuanto menor sea la profundidad menor será el periodo de detención necesario para recolectar dicha partícula.” (ARBOLEDA Valencia, 2000)

Sedimentación: “se entiende por sedimentación a aquellos fenómenos mediante los cuales los sólidos en suspensión en un fluido son separados del mismo, debido al efecto de la gravedad.” (ARBOLEDA Valencia, 2000)

En un sentido más amplio el termino sedimentación comprende un grupo de acciones diferentes según el tipo y concentración de solidos o partículas en suspensión.

Sedimentación de partículas discretas: “Una partícula discreta es aquella que, durante la sedimentación, no altera su tamaño, forma o peso y al caer libremente a través de un líquido en reposo, se acelera hasta que la resistencia de fricción o arrastre del fluido equilibra a la fuerza impulsora que actúa sobre la partícula. De ahí en adelante, la partícula se asienta a una velocidad uniforme (terminal).” (ROMALHON, 2003)

Sedimentación de partículas floculantes: “partículas floculantes son

aquellas producidas por la aglomeración de partículas coloides desestabilizadas a consecuencia de la aplicación de agentes químicos. A diferencia de las partículas discretas, las características de este tipo de partículas, forma, tamaño, densidad si cambian durante la caída” (VEGA Guzman, y otros, 2006)

La sedimentación que se lleva a cabo en los sedimentadores convencionales es un ejemplo de este proceso.

Turbidez: “La turbidez es una medida del grado en el cual el agua pierde su transparencia debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos en suspensión haya en el agua, más sucia parecerá ésta y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua.” (Jorge, 2007).

RESUMEN

Con el fin de implementar una nueva práctica de laboratorio para la asignatura de Plantas de tratamiento de agua potable y residual, se construyó un prototipo para la evaluación de los procesos de remoción partículas discretas dentro del proceso de potabilización del agua.

Anterior a la elaboración del prototipo se realizó una investigación teórica para extraer los conceptos y parámetros necesarios para evaluar el comportamiento de las partículas dentro de un sedimentador. También se realizó un estado del arte para conocer técnicas y/o procedimientos aplicados actualmente al campo de la sedimentación de partículas en el agua.

Posterior al estudio teórico, se realizó el diseño conceptual del prototipo bajo el criterio de ingeniería concurrente. Dicho criterio subdivide el diseño en Ideación, en el cual se identificó el problema base, las ideas y diseño preliminar del prototipo. El refinamiento donde se realizó el análisis y visualización del diseño y por último la implantación que describe la construcción y producción del prototipo.

El cuerpo del prototipo está construido en acrílico transparente, para permitir observar el proceso físico de decantación. Cuenta con una altura de 2 m para simular la altura promedio de un sedimentador. Un total de 7 puntos de toma de muestra, distanciadas equidistantemente a 25cm de eje a eje. Por último, se implementó un anillo con perforaciones laterales que permitirán el paso de aire por medio una manguera, para mantener la muestra en constante turbulencia.

Finalmente, se realizaron pruebas al prototipo verificando su capacidad de remover partículas en diferentes tiempos y alturas. Este laboratorio tiene como fin que los estudiantes puedan estudiar el fenómeno de sedimentación dentro de las instalaciones de los laboratorios de la universidad Católica de Colombia.

INTRODUCCION

El presente trabajo se realizó como proyecto de investigación, se consideró el diseño de un prototipo a mediana escala de una torre de sedimentación que evalúa el porcentaje de remoción de partículas (Discretas y Floculentas). Esto se hizo con el fin de que las plantas tengan un parámetro adicional para el diseño propio de sedimentadores. Se enfatiza en la construcción de una serie de curvas características, que se encargan de generar un porcentaje óptimo de remoción de una muestra problema. Esta muestra consiste en Arenas de Rio tamizadas, en esta situación se analizaron las partículas que se retienen en los tamices 100, 200 y < 200 diámetro las cual, al estar en dispersión en el agua genera turbiedad y simulan el efecto de turbiedad natural.

El siguiente trabajo consta de una serie de capítulos en los que se abarca de forma general y especifica la teoría y la experimentación para la puesta en marcha del prototipo construido.

En principio se realizó un fundamento teórico y un estado del arte acerca de la sedimentación, Esto con el fin de conocer técnicas y/o procedimientos aplicados al campo de la remoción de partículas en el agua.

Posteriormente se realizó la elaboración Teórica del prototipo, realizando dimensionamiento y cálculos matemáticos para la elaboración experimental del prototipo entre ellos se destaca: la evaluación y estudio de los materiales a emplear en el prototipo, Como también de la muestra problema.

Seguido a la información analizada previamente, se conllevó a la construcción física de la torre o columna de sedimentación. Ya realizado el producto, se efectuaron los ensayos pertinentes. Recolectando y analizando la información propicia como: Porcentaje de remoción en cada punto de toma de muestra, Cargas superficiales (velocidades de sedimentación) y tiempo de detención. Estos datos son necesarias para el cálculo de la superficie del sedimentador.

1. ANTECEDENTES Y JUSTIFICACION

La idea surge luego de una visita académica realizada a la planta de tratamiento de agua potable del municipio de Viota (Cundinamarca), en el cual se pudo identificar una serie de factores ineficientes en su operación, de los cuales no se tienen control alguno. Tampoco se cuenta con alguna entidad que regule de forma estricta la operación de estas. Este tipo de descuidos pueden generar un mal tratamiento en el agua, concibiendo riesgos a toda la población que se beneficia de este recurso. Por este motivo, se inició una investigación sobre los diferentes procedimientos de la planta, y se determinó que la sedimentación tiene un papel fundamental en la eliminación de partículas pueden llegar a ser perjudiciales para la salud.

“Se observa que en el año 2013 los grandes centros urbanos, las capitales departamentales y la mayoría de las ciudades intermedias fueron abastecidas con agua para consumo humano Sin Riesgo, mientras que las condiciones del suministro de agua en municipios menores y zonas rurales del país, al analizar el IRCA, se encontraron con niveles de riesgo que van desde Medio hasta Inviabile Sanitariamente.” (MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL, 2013)

El laboratorio de Ingeniería Civil de la Universidad Católica de Colombia, no posee una metodología de laboratorio apropiada para el estudio de la sedimentación, aparte de un test de jarras. Se decidió tomar este tema de proyecto de grado, con el objetivo de establecer una metodología de ensayos de laboratorio para poder analizar el comportamiento de las partículas dentro de un sedimentador.

2. OBJETIVOS

2.1. GENERAL

- Construir una torre de sedimentación para la evaluación de los procesos de remoción de partículas discretas en el proceso de tratamiento de agua potable.

2.2. ESPECIFICOS

- Analizar la muestra problema determinando propiedades fisicoquímicas tales como: Turbiedad, densidades y temperatura
- Determinar cargas superficiales y/o velocidades de sedimentación como también porcentajes de eficiencias.
- Crear una torre de sedimentación que permita evaluar la eficiencia del proceso de floculación en la potabilización del agua.
- Presentar una propuesta de guía de trabajo para el laboratorio de plantas de tratamiento para sedimentación tipo I y tipo II

3. PLANTEAMIENTO Y FORMULACION DEL PROBLEMA

¿Se diseñan los sedimentadores de una PTAP según los indicadores de resultados obtenidos de una torre o columna de sedimentación?

El problema del diseño, manejo del tratamiento de aguas potables en el país, radica principalmente en el poco control de las organizaciones encargadas del cumplimiento de los parámetros mínimos para el funcionamiento óptimo de las mismas PTAP.

“En Colombia se logra percibir una gran negligencia de los 1.120 municipios que se encuentran dentro de nuestro país, en al menos 800 el agua que consumen los habitantes es un riesgo para la salud. Sin embargo, los casos críticos se registran en 317 localidades, donde los acueductos suministran agua considerada de alto riesgo, y en otras 17 no se deben tomar ni usar para la ducha. Estos municipios, sorprendentemente, no cuentan con planta de tratamiento, o a pesar de que la hay no tienen operador, o este debe ser contratado cada año y mientras realizan ese trámite se desmejora el servicio, o simplemente el prestador no tiene para comprar los insumos o no conoce la dosificación” (RODRÍGUEZ, 2013).

“Por esto se hace necesario buscar obtener la máxima eficiencia de todas las unidades. La eficiencia global del sistema de tratamiento, se basa en lograr una determinada calidad de agua deseada, a menor costo de operación posible. Por eso se enfocará en el procedimiento de remoción de partículas discretas y floculentas.” (PIGNATTA, 1998).

Esta investigación busca determinar un criterio racional, que permita a los operarios ingenieros y/o encargados responsables de la operación de plantas de tratamiento, evaluar el funcionamiento de un sedimentador, en forma independiente de las características físico-químicas del agua en tratamiento para el consumo de agua.

En cuanto el producto a entregar se destinará como nuevo laboratorio para la asignatura de plantas de tratamiento de agua potable y residual, el cual podrá ser usado por los estudiantes que cursen la asignatura y poder así ampliar sus conocimientos sobre este tema tan importante como lo es la evaluación de partículas dentro del campo de la potabilización. Además, la universidad podrá brindar el servicio a entidades municipales y departamentales para que puedan realizar sus estudios. Ya que es un elemento que funciona con cualquier agua que se quiera tratar y/o evaluar

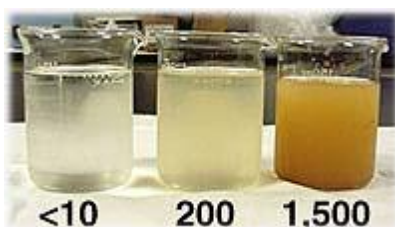
4. FUNDAMENTO TEORICO

4.1. CONCEPTO GENERAL

“Por sedimentación se denomina el proceso mediante el cual se asientan los sólidos suspendidos en un fluido, bajo la acción de la gravedad” (Perez, 1981).

“El proceso de sedimentación en una planta de tratamiento de agua potable convencional, es en general el principal responsable en remoción de partículas causantes de turbiedad y color. El grado de remoción exigido a esta etapa, depende fuertemente de la eficiencia del proceso posterior de filtración.” (PIGNATTA, 1998).

Figura 1. Turbiedad



Fuente: (USGS, 2015)

Complementando el concepto anterior, se define La sedimentación como un proceso físico, que consiste en la separación de las partículas suspendidas con un peso específico mayor al del agua mediante la acción de la gravedad es una de las operaciones unitarias más utilizadas en el tratamiento de agua potable, este proceso se da en los tanques de decantación o sedimentación primaria habitualmente después de que al agua se le realiza un tratamiento físico-químico como la coagulación-floculación, aquí se puede presentar la sedimentación floculenta en la que las partículas no actúan como partículas discretas si no que se agregan a medida que se van sedimentando, aumentando la masa de las partículas, crecen los floculos y aumenta la velocidad de sedimentación.

Las impurezas naturales pueden encontrarse en las aguas según tres estados de suspensión en función del diámetro. Éstos son:

- a) Suspensiones hasta diámetros de 10^{-4} cm.
- b) Coloides entre 10^{-4} y 10^{-6} cm.
- c) Soluciones para diámetros aún menores de 10^{-6} cm.

Estos tres estados de dispersión dan igual lugar a tres procedimientos distintos para eliminar las impurezas.

El primero destinado a eliminar las de diámetros mayores de 10^{-4} cm. Constituye la "sedimentación simple"; es simple cuando las partículas que se asientan son discretas, o sea partículas que no cambian de forma. Tamaño o densidad durante el descenso en el fluido.

El proyecto buscara estudiar específicamente este tipo de sedimentación. El segundo denominado "sedimentación inducida" implica la aglutinación de los coloides para su remoción a fin de formar un "floc" que pueda sedimentar, es decir, que durante la sedimentación se aglutinan entre sí cambiando de forma y tamaño y aumentando de peso específico.

Finalmente, el tercer proceso, que esencialmente consiste en transformar en insolubles los compuestos solubles, aglutinarlos para formar el "floc" y permitir así la sedimentación.

Es decir que, en muchos casos, las impurezas pueden ser, al menos en teoría removidas mediante el proceso de sedimentación.

La tabla siguiente indica los tiempos de decantación de las diferentes partículas en función de sus dimensiones; densidad y de la temperatura del agua.

Tabla 1. Velocidad de sedimentación según el tamaño de la partícula.

Tipo de Partículas	Diámetro (mm)	Tiempo de Caída	
		Densidad 2.65	Densidad 1.1
Grava	10	0.013 s.	0.2 s.
Arena Gruesa	1.0	1.266 s.	20.9 s.
Arena fina	0.1	126.66 s.	34.83 min.
Lodo fino	0.01	3.52 h.	58 h.
Bacterias	0.001	14.65 d.	249.1 d.
Coloides	0.0001	4.12 a.	66.59 d.

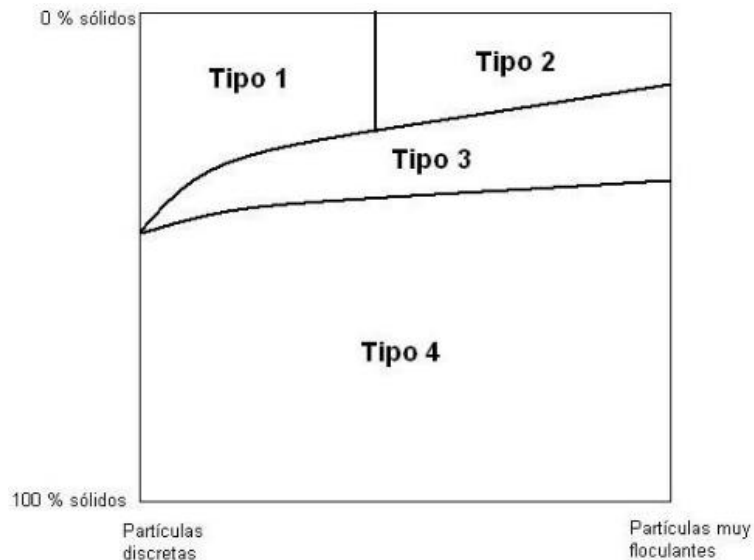
Fuente:

La sedimentación es, en esencia, un fenómeno netamente físico y constituye uno de los procesos utilizados en el tratamiento del agua para conseguir su clarificación. Está relacionada exclusivamente con las propiedades de caída de las partículas en el agua. Cuando se produce sedimentación de una suspensión de partículas, el resultado final será siempre un fluido clarificado y una suspensión más concentrada.

Las partículas en suspensión sedimentan en diferente forma, dependiendo de las características de las partículas, así como de su concentración. Es así que podemos referirnos a la sedimentación de partículas discretas, sedimentación de partículas floculentas y sedimentación de partículas por caída libre e interferida.

Dependiendo de la cantidad de sólidos en suspensión que tengamos presentes en el agua y de su tendencia a formar flóculos, podemos distinguir cuatro tipos diferentes de sedimentación, como se indica en la gráfica 1.

Gráfica 1. Tipos de Sedimentación.



Fuente: (imagua, 2013)

❖ Sedimentación de Tipo 1 o de Partículas Discretas

Hay una baja concentración de sólidos, las partículas sedimentan como entidades individuales y no interaccionan entre ellas. Este tipo de sedimentación es la que se utiliza para eliminar las arenas en las aguas residuales.

❖ Sedimentación de Tipo 2 o Floculenta

Hay una baja concentración de sólidos en suspensión en el agua, pero las partículas interaccionan entre ellas y forman flóculos (grupos de partículas adheridas entre sí).

La floculación es una operación muy importante cuando tenemos coloides presentes en el agua. Los coloides son partículas netamente cargadas, por

lo que no sedimentan por sí mismas. Mediante la adición de coagulantes y floculantes, conseguimos desestabilizar estas cargas y posibilitamos que estas partículas sedimenten.

❖ Sedimentación de Tipo 3 o Retardada o Zonal

Este tipo de sedimentación es característica de suspensiones con una elevada concentración de sólidos. Las partículas se adhieren entre sí y la sedimentación se produce en bloque o pistón.

Las interacciones entre las partículas provocan una disminución de la velocidad de sedimentación de cada una de ellas.

Se caracteriza por que hay una capa límite bien definida entre la masa sedimentable y el líquido sobrenadante.

❖ Sedimentación de Tipo 4 o de Compresión

“La sedimentación por compresión es la que típicamente se da en el fondo de los clarificadores en un proceso de lodos activos. La concentración de sólidos es tan grande que se ha creado una estructura, y la única manera de progresar en la sedimentación es mediante la compresión ejercida por el peso de las nuevas partículas que se van depositando encima de las ya existentes.” (imagua, 2013)

4.2. SEDIMENTACION DE PARTICULAS DISCRETAS

Se llama partículas discretas a aquellas partículas que no cambian de características (forma, tamaño, densidad) durante la caída.

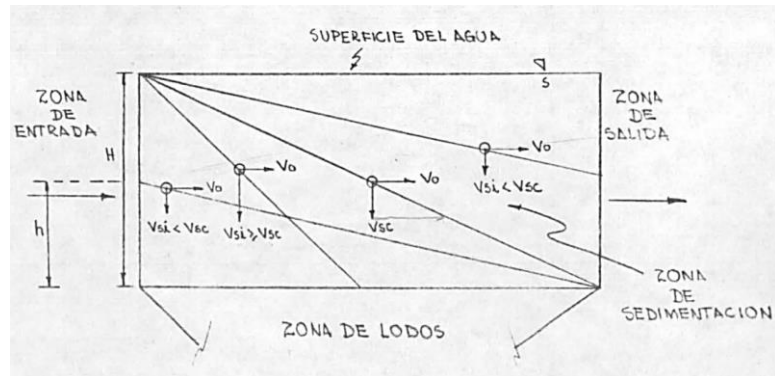
La teoría del funcionamiento de la zona de sedimentación se basa en las siguientes suposiciones simplificadas:

1.- El asentamiento tiene lugar exactamente como sucedería en un recipiente con fluido en reposo de la misma profundidad.

2.- La concentración de las partículas a la entrada de la zona de sedimentación es homogénea, es decir, la concentración de partículas en suspensión de cada tamaño es uniforme en toda la sección transversal perpendicular al flujo.

3.- La velocidad horizontal del fluido en el sedimentador está por debajo de la velocidad de arrastre de los lodos, por lo tanto, una vez que una partícula llegue al fondo, permanece allí. La velocidad horizontal es constante lo mismo que la velocidad de sedimentación de cada partícula, por lo que la trayectoria de las partículas en el sedimentador es una línea recta. (Figura 2.)

Figura 2. Velocidad de caída de una partícula crítica

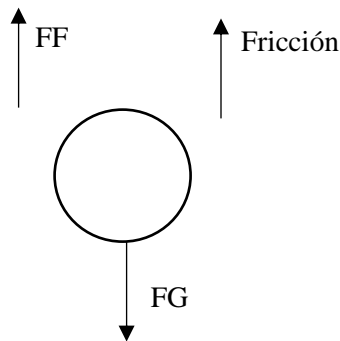


Fuente: (Perez, 1981)

4.2.1. EXPRESIONES DE VELOCIDAD PARA PARTICULAS DISCRETAS

Si tenemos una partícula que se deja caer en el agua, esta partícula estará sometida a dos fuerzas (figura 2): fuerza de flotación (FF), que es igual al peso del volumen del líquido desplazado por la partícula (Principio de Arquímedes), y fuerza gravitacional (FG).

Figura 3. Fuerzas actuantes en una partícula.



Fuente: Autores

$$\text{Si } FF = \rho * g * V \quad (1)$$

$$\text{y } FG = \rho_s * g * V \quad (2)$$

Donde ρ es la densidad del líquido; ρ_s la densidad del sólido y V volumen de la partícula.

De la acción de ambas fuerzas tenemos la fuerza resultante, que será igual a la diferencia de estos dos valores y estará dada por:

$$F_i = g * V * (\rho_s - \rho) \quad (3)$$

Donde F_i es la fuerza resultante o fuerza de impulsión.

Debido a esta fuerza (F_i), la partícula desciende con velocidad creciente, pero a medida que baja, la fricción que el líquido genera en ella crea una fuerza de roce definida por la Ley de Newton, cuyo valor es:

$$F_R = C_D * A * \rho * \frac{V_s^2}{2} \quad (4)$$

Donde F_R es la fuerza de rozamiento; $\frac{V_s^2}{2}$ es la energía cinética; A es el área transversal al escurrimiento; V_s es la velocidad de sedimentación y C_D es el coeficiente de arrastre.

La velocidad de sedimentación de una micropartícula rígida, lisa, de forma esférica, en un fluido viscoso del tipo newtoniano, fue modelada matemáticamente por Stokes en 1850, descrita de la siguiente forma:

$$V_s = \frac{g}{18} \left(\frac{\rho_1 - \rho}{\vartheta c} \right) d_p^2 \quad (5)$$

Donde ρ_1 densidad media de la partícula (g/cm^3); ρ densidad media del fluido (g/cm^3); d_p diámetro medio del sistema de micropartículas (mm); g aceleración de gravedad (m/s^2) y ϑc viscosidad cinemática del fluido (m^2/s).

Lo anterior ocurre si en hay un flujo laminar en donde $10^{-4} < Re < 0,2$.

El número de Reynolds para un sistema trabajando bajo flujo laminar:

$$Re = \frac{V_s * d_p}{\vartheta c} \quad (6)$$

Donde Re es el número de Reynolds; V_s es la velocidad de sedimentación y d_p diámetro medio del sistema de micropartículas (mm).

Si lo anterior no ocurre, hay que hacer una corrección con un coeficiente de descarga (C_D) y aplicar la fórmula para la velocidad de sedimentación de Newton, de la siguiente forma:

Tabla 2. Valores de coeficientes de arrastre.

Autor	Expresión
Rich	$C_D = \frac{18,5}{Re^{0,60}}$
Hatch	$C_D = \frac{14}{Re^{0,50}}$
Allen	$C_D = \frac{12,65}{Re^{0,50}}$
Fair-Geyer-Okun	$C_D = \frac{24}{Re} + \frac{3}{\sqrt{Re}} + 0,34$
Schiller-Newman	$C_D = \frac{12}{Re} (1 + 0,14 Re^{0,687})$
Goldstein	$C_D = \frac{12}{Re} + \frac{3}{16} Re - \frac{19}{1.280} Re^2 + \frac{71}{20.480} Re^3$

Fuente: (Maldonado, 2002)

De acuerdo a lo visto, tenemos que para $Re < 0,2$ el valor de C_D que usamos es el de Fair-Geyer-Okun. Y la expresión que tendremos finalmente para la velocidad de sedimentación encontrada experimentalmente por Newton será:

$$V_S = \sqrt{\frac{4g}{3} \times \frac{\rho_1 - \rho}{C_D} \times d_p} \quad (7)$$

Donde V_S es la velocidad de sedimentación (m/s); Donde ρ_1 densidad media de la partícula (g/cm^3); ρ densidad media del fluido (g/cm^3); C_D es el coeficiente de descarga (adimensional) y d_p es el diámetro de la partícula.

En la sedimentación existen cuatro zonas en función del N° de Reynolds:

Zona (a) Zona de flujo laminar $10^{-4} < Re < 0,2$.

Zona (b) Zona de transición $0,2 < Re < 500$ a 1000 .

Zona (c) Zona de régimen turbulento 500 a $1000 < Re < 2 \times 10^5$.

Zona (d) $Re > 2 \times 10^5$.

4.3. SEDIMENTACION DE PARTICULAS FLOCULENTAS.

La mayoría de los principios estudiados en la sedimentación de partículas discretas son aplicables a la sedimentación de partículas floculentas.

“Se supone que el agua que se va a sedimentar ha sido previamente coagulada y que por lo tanto el tamaño de las partículas en suspensión es prácticamente constante. Es por esto que la teoría de sedimentación para partículas discretas sigue siendo válida para el caso de agua coagulada.” (Perez, 1981)

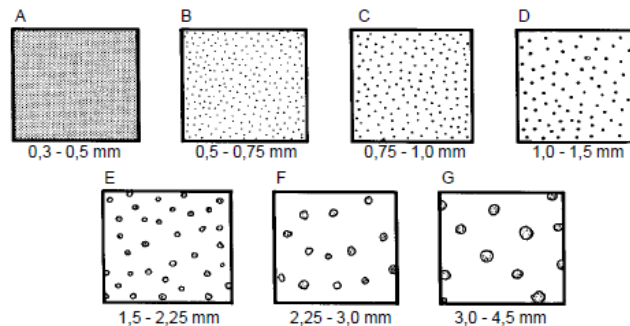
El proceso de coagulación-floculación por el cual las partículas se aglutinan en pequeñas masas con peso específico superior al del agua llamadas floc. Dicho proceso se usa para:

- Remoción de turbiedad orgánica o inorgánica que no pueda sedimentar rápidamente.
- Remoción de color verdadero y aparente.
- Eliminación de bacteria, virus y organismos patógenos susceptibles de ser separados por coagulación.
- Destrucción de algas y plancton en general.
- Eliminación de sustancias productoras de sabor y olor en algunos casos y de precipitados químicos suspendidos o compuestos orgánicos en otros.

(ARBOLEDA Valencia, 2000)

El diámetro de los flóculos es variable desde menos de 0,001 mm hasta más de 5 mm, dependiendo de las condiciones de mezcla y floculación (gradientes de velocidad y tiempo de retención). Tal como se muestra en la figura 3.

Figura 4. Índices de Willcomb para determinar el tamaño del flóculo



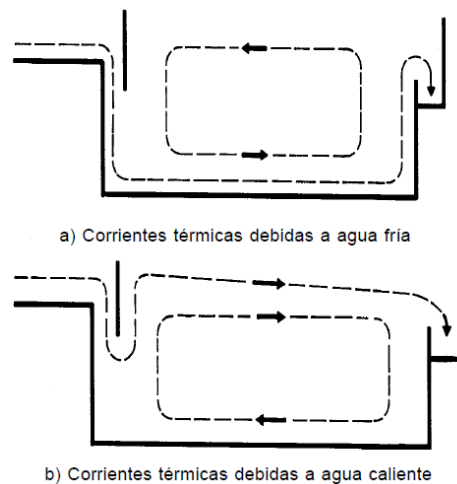
Fuente: (NARRO, 1994)

4.5. FACTORES QUE INFLUYEN EN EL PROCESO DE SEDIMENTACION

4.5.1. Calidad del agua

Las variaciones de concentración de materias en suspensión modifican, en primer lugar, la forma de sedimentación de las partículas (con caída libre o interferida), así como las propiedades de las partículas modifican la forma de depósito (sedimentación para partículas discretas y decantación para partículas floculentas). Adicionalmente, variaciones de concentración de partículas o de temperatura producen variaciones de densidad del agua y originan corrientes cinéticas o térmicas que, a su vez, generan cortocircuitos hidráulicos en las unidades de tratamiento. Esto se evidencia en la figura 4.

Figura 5. Corrientes térmicas debidas al agua caliente.



Fuente: (Maldonado, 2002)

4.5.2. CONDICIONES HIDRAULICAS.

Los parámetros hidráulicos en el diseño tienen una gran influencia en la eficiencia de los sedimentadores, los principales son:

a) En la zona de sedimentación

“En esta zona se debe tener un número de Reynolds lo más bajo posible y el número de Froude más elevado para tender a un flujo laminar y estabilizar el flujo. En esta zona las líneas de flujo no deben encontrarse con ningún tipo de obstrucciones que alteren su trayectoria.” (VILLACRECES, 2009)

Adicionalmente, la presencia de flujo de pistón mejora el proceso y el flujo mezclado no lo favorece.

b) En la zona de entrada

La zona de entrada en un sedimentador es un conjunto de estructuras que debe permitir una distribución uniforme del flujo de agua hacia la zona de sedimentación. En una unidad de sedimentación convencional de flujo horizontal, esta distribución uniforme debe darse a todo lo ancho de la unidad y en profundidad.

c) En la zona de salida

Esta zona se caracteriza por permitir una recolección uniforme de agua sedimentada a una velocidad tal que evite arrastrar flóculos en el efluente. Canaletas de pequeña longitud, mal ubicadas, mal niveladas o impropriamente diseñadas producen cortocircuitos hidráulicos y zonas muertas que pueden inutilizar grandes áreas de los sedimentadores.

4.5.3. Factores externos

“Los procesos realizados previos a la sedimentación son de gran importancia en la eficiencia y resultado que esta llegue a tener, aspectos como la condición del ambiente y el proceso previo de coagulación-floculación, para lograr una buena sedimentación o eficiencia de la misma es necesario que se halla hecho una buena coagulación y floculación.” (Restrepo Osorno , 2009)

En unidades grandes el viento puede crear oleajes de cierta magnitud, lo que interfiere el proceso de sedimentación ocasionado frecuentes re suspensiones de partículas.

4.6. TEORIA COLUMNAS DE SEDIMENTACION.

En base a la concentración y a la tendencia a la interacción de las partículas pueden efectuarse cuatro clasificaciones generales sobre la forma de dichas partículas que se depositan. Es frecuente que se produzca más de un tipo de sedimentación en un momento dado durante la sedimentación y también es posible que los cuatro tipos se tengan en forma simultánea. En una columna de sedimentos pueden llegar a presentarse estos cuatro tipos de sedimentación expuestos en el concepto general de este fundamento teórico (Tipo 1, Tipo 2, Tipo 3 Y Tipo 4). Aunque cabe aclarar que por lo general las más frecuentes o usuales son la tipa 1 y tipo 2.

En la prueba se usa un tubo transparente mayor a 2 m de longitud y minino 100 mm de diámetro (preferiblemente mayor), equipado con grifos de muestreo separados a 20 cm o una mayor distancia. El tubo se monta verticalmente y se llena con una muestra representativa de sólidos en suspensión. A intervalos de tiempo se toman muestras, cuya cantidad debe ser la considerada para poder hacer el análisis, de grifos sucesivos, comenzando por el de la parte superior.

Los intervalos de tiempo se determinarán por la velocidad de sedimentación de las partículas, este procedimiento indicará si es que el tiempo de detención es un factor en la velocidad de clarificación.

Se hace un gráfico de la de sólidos suspendidos en cada de las muestras en función de la velocidad nominal de sedimentación de la muestra, la cual se determina a partir de las correspondientes profundidades de los grifos, muestra dividida por el tiempo transcurrido entre el inicio de la prueba y el tiempo de muestreo. (Durand, 2013)

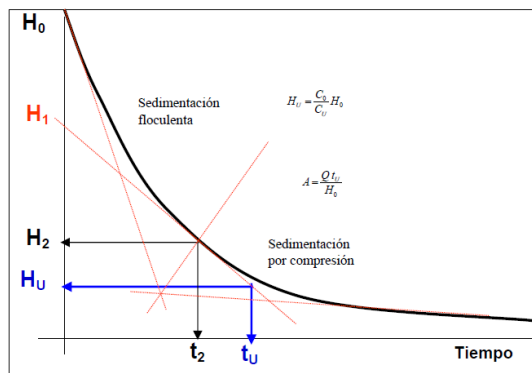
❖ **Calculo del Área de un Sedimentador a partir de la gráfica H_0 vs. t .**

A continuación, se detalla el cálculo de Área de un sedimentador a partir de una curva H_0 vs. t . La grafica de análisis de sedimentación retardada consta de los siguientes pasos.

- Trazamos dos tangentes a la curva H_0 vs. t , donde H_0 es la altura de la columna de sedimentación y t es el tiempo que transcurre, durante el proceso de sedimentación.
- Luego de esto se traza una directriz, partiendo de la intersección de las tangentes, la cual divide nuestra grafica en dos zonas llamadas, sedimentación flocúlenla y sedimentación por comprensión.
- Del punto de intersección de la directriz con la curva, cortamos el eje de las Y, para obtener la altura H_u (grafica), de igual manera prolongamos al eje X, obtenemos el tiempo en el cual la sedimentación floculenta, cambia ha sedimentación por comprensión.
- Es importante citar que este valor calculado gráficamente no difiere mucho en cuanto al valor teórico. Con estos datos procedemos a calcular el área del sedimentador, teniendo el caudal (Q), tiempo (t_u), y la altura de la probeta (H_0).

Lo anterior se ve reflejado en la grafica

Grafica 2. Análisis de la curva decantación interferida.



Fuente: (VEGA Guzman, y otros, 2006)

Adicionalmente tenemos conceptos como la turbiedad que es un factor importante a la hora de analizar el agua y determinar si es apta para el consumo humano debido a que la turbiedad en el agua es sinónimo de impurezas.

La turbiedad no es más que la capacidad de un líquido de diseminar un haz luminoso, puede deberse a partículas de arcillas provenientes de la erosión del suelo, a algas o a crecimientos bacterianos.

El color está constituido por sustancias químicas provenientes la mayoría de las veces por la degradación de la materia orgánica, tales como hojas y plantas acuáticas con las cuales entra en contacto. El conocimiento de tales acontecimientos es básico para entender los procesos de remoción. (ARBOLEDA Valencia, 2000)

4.6.1. Ensayos para determinar la eficiencia.

La forma más adecuada para medir la eficiencia de un sedimentador es un problema por resolver.

Normalmente comúnmente se toma como la relación entre la concentración de partículas a la salida N_t y la concentración de partículas a la entrada del sedimentador, es decir:

$$eficiencia = 1 - \frac{N_t}{N_0} = 1 - \frac{turbiedad\ de\ salida}{turbiedad\ de\ entrada}$$

Este sistema de medir la eficiencia tiene el inconveniente de que está influenciado por el valor de N_0 . Si N_0 es alto, las reducciones aparecen mucho más grandes que si es pequeño. Por ejemplo, si un sedimentador produce un agua con 5 U.J. de turbiedad, y la turbiedad del agua que le entra es de 50 U.J., la eficiencia será de $1 - 5/50 = 0.9$ (90 % si en cambio la turbiedad de entrada es de 500, la eficiencia será $1 - 5/500 = 0.99$ (99 %), no obstante que en ambos casos el efluente es de la misma calidad. Al comparar por tanto la eficiencia de un decantador con otro, por este sistema, debe tenerse en cuenta el valor de N_0 , ya que al variar éste, el porcentaje de remoción cambia, sin que necesariamente N_t varíe.

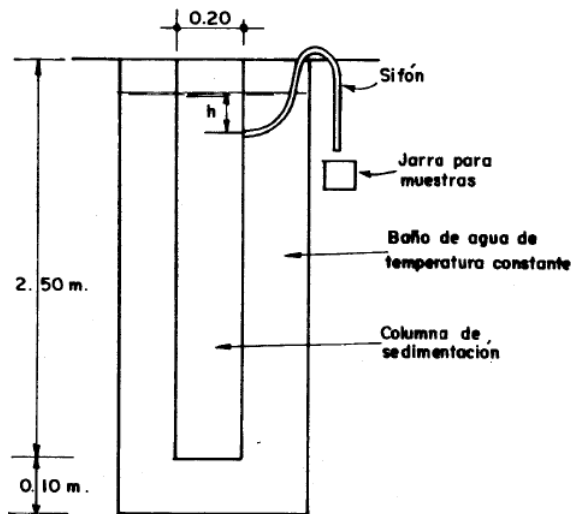
El científico Camp propuso, en 1946, un ensayo al respecto. Consiste en colocar en un recipiente como el de la figura 6-1, la suspensión que se va a analizar. A diferentes alturas se toman muestras de agua y se dibuja la curva de turbiedad remanente versus velocidad de sedimentación de las partículas. El tipo de columna de sedimentación propuesta por Camp, no suele ser de uso frecuente. En forma simplificada puede, por eso, procederse así:

(a) Extráigase del final del floculador en seis jarras (beakers) muestras de agua del mismo volumen cada una, procurando no romper el floc.

(b) Agítense todas simultáneamente hasta mantener una concentración uniforme de partículas en cada jarra. Esta operación debe hacerse rápidamente para no aumentar el período de floculación.

(c) Luego con una pipeta volumétrica o con el sifón descrito en la figura 2. Tómese una muestra de agua de cada jarra a intervalos regulares de tiempo. Por ejemplo: 1 minuto después de suspendida la agitación en la primera; 3 minutos después, en la segunda; 5, en la tercera; 10, en la cuarta; 60, en la quinta; y 180, en la sexta. La profundidad a la cual se tome la muestra debe ser la misma; por ejemplo, 5 cm desde la superficie, y la velocidad de extracción debe ser también la misma para todas.

Figura 6. Columna de sedimentación.



Fuente: (ARBOLEDA Valencia, 2000).

(d) Con los resultados obtenidos se hace un gráfico, en el cual se relaciona la turbiedad remanente en cada jarra N_t después del tiempo t con la turbiedad inicial N_0 dibujando $\frac{N_t}{N_0}$ en las ordenadas y la velocidad de sedimentación para cada jarra, en las abscisas.

La fracción de turbiedad o concentración de partículas que queda en el líquido de cada jarra es igual a C . La fracción removida es igual a $1 - C$. La fracción total removida será igual a:

$$(1 - C) + \frac{v_s}{v_{sc}}$$

5. ESTADO DEL ARTE SOBRE PROCESOS DE SEDIMENTACION.

5.1. UTILIZACIÓN DEL PARÁMETRO “EFICIENCIA” EN REMOCIÓN DE TURBIEDAD EN SEDIMENTADORES.

Esta investigación consiste en la determinación de un criterio racional, que permita a los ingenieros responsables de la operación de plantas de tratamiento, evaluar el funcionamiento de un sedimentador, en forma independiente de las características físico-químicas del agua bruta. (PIGNATTA, 1998). Uno de los parámetros más importantes es el porcentaje de la eficiencia de turbiedad que es el resultado de mirar la diferencia entre la turbiedad de entrada menos la que sale del sedimentador, luego de mirar esta diferencia se compara entre la entrada y con esto se verifica la eficiencia; a este punto de vista se le anexa que para un sedimentador es mucho más fácil remover partículas entre un rango mayor de concentración a lo que no se le puede exigir a un sedimentador la remoción de un porcentaje absoluto de remoción de turbiedad. Por esta Razón, se hace necesario la adopción de un criterio que permita evaluar realmente el desempeño de un sedimentador, ya que la definición de eficiencia no nos aporta elementos suficientes respecto a su funcionamiento.” (PIGNATTA, 1998).

Para el desarrollo se debe tener en cuenta el estudio de curvas históricas de eficiencias del sedimentador, para estas curvas se toman en cuenta varios factores externos como lo son la carga hidráulica, temperatura intensidad del viento volumen de lodo acumulado y todas estas están en relación a la turbiedad del agua bruta. De estas se saca una curva y se define una turbiedad de referencia. Entonces, luego estos valores son comparados con la turbiedad del agua sedimentada y determinan tres rangos. Estos rangos determinan: Alta eficiencia, eficiencia aceptable y baja eficiencia. Se opta por buscar siempre la eficiencia aceptable, puesto que la alta y baja eficiencia nos puede producir gasto innecesario o baja dosificación requerida de coagulante. Esto puede producir un aumento de la turbiedad del agua sedimentada, y consecuentemente una disminución de la eficiencia.

Como conclusión de esta se puede decir que en las plantas donde se desee realizar este tipo de estudio, es posible establecer un sistema de control, que compare la turbiedad del agua sedimentada con la turbiedad de referencia, acoplado a un sistema de alarma.

Este sistema de evaluación de calidad es muy importante puesto que nos puede ayudar a la optimización de los sedimentadores que no fueron bien diseñados y que trabajan en rangos de eficiencia variados. Por eso también es indispensable realizar bien el estudio del diseño previo de los sedimentadores. La columna de sedimentación resulta ser el ensayo más importante para la evaluación de porcentajes de remoción de partículas por lo que también sería muy útil realizar varios análisis teniendo en cuenta factores abióticos que puedan variar el porcentaje de eficiencia de remoción.

5.2. EFECTO DEL INCREMENTO EN LA TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA SOBRE LA EFICIENCIA DE PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN.

El presente artículo fue elaborado en el año 2011 por Carolina Montoya, Diana Loaiza Patricia Torres, Camilo Hernán Cruz y Juan Carlos Escobar, el cual resume El análisis histórico del comportamiento de la turbiedad del río Cauca, del agua clarificada y tratada permitió evaluar el efecto del incremento en la turbiedad del agua cruda sobre la eficiencia de los procesos convencionales de potabilización que se realizan en la planta Puerto Mallarino en Cali (Colombia) Siendo la filtración la etapa más vulnerable. Se identificó alta correlación lineal entre la turbiedad máxima del agua cruda la dosificación de productos químicos utilizados en el tratamiento del agua (coagulante y desinfectante). (MONTROYA, y otros, 2011). Factores Ambientales sumados al mal tratamiento que se les da a los cuerpos de agua hacen que la calidad de la misma sea regular lo que conlleva a buscar otras alternativas de tratamiento hasta el punto de suspender el servicio. La eficacia de una planta de potabilización está asociada con el cumplimiento de los estándares de calidad de agua establecidos, independiente de las variaciones en la calidad de la fuente (Li y Huck, 2008).

Aunque a nivel mundial la organización mundial de la Salud (OMS), no tiene un valor fijo de turbiedad requerido, esta organización recomienda que el parámetro ideal para el caso de la turbiedad en el agua tratada ronda por los 0.1 UNT. Diferentes organizaciones mundiales tienen establecida su propia especificación, mientras en Colombia el ministerio de ambiente propuso un máximo de 2 UNT la USEPA (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos) y la unión europea se recomienda que la turbiedad se mantenga en por debajo de los 1 UNT.

En un caso más puntual, el río Cauca es la principal fuente de abastecimiento de agua para la población de la ciudad de Cali, cuyo tratamiento es convencional, más algunos tratamientos complementarios. Se cuentan con 2 plantas de tratamientos las cuales están diseñadas o tienen la capacidad de manejar agua con turbiedad de 3000 UNT. Sin embargo, en los últimos años se ha originado un preocupante incremento del número y duración de suspensiones del servicio asociadas a casos de alta turbiedad generados por el deterioro de la calidad del agua del río y de sus tributarios.

Este artículo presenta la evaluación del efecto de eventos de alta turbiedad en el río Cauca sobre los procesos convencionales de potabilización en la principal planta de la ciudad, Puerto Mallarino (PM), a partir de los registros horarios de turbiedad de los años 1996, 2005 y 2007, teniendo en cuenta que durante ellos el agua cruda presentó alta turbiedad.

Para el evento de alta turbiedad y criterios para su identificación se definieron 2 criterios principales, el primero está relacionado con cambios repentinos en

relación con un corto tiempo y el segundo va ligado directamente a la magnitud de la turbiedad.

Consecutivamente se aplica análisis estadísticos para posteriormente establecer promedios de turbiedad antes y después del evento de máxima turbiedad y los tiempos de duración de dichos eventos.

“Los eventos de alta turbiedad identificados presentaron una turbiedad máxima entre 476,0 y 1130,4 UNT, una duración entre 13,6 y 19,7 horas y un tiempo transcurrido entre el comienzo del evento y la hora en que se presentó la turbiedad máxima entre 4,4 y 6,0 horas.” (MONTTOYA, y otros, 2011).

Para analizar el efecto de eventos de alta turbiedad sobre los procesos de potabilización de se realiza la matriz Coeficientes de correlación de Spearman.

Tabla 3. Matriz Coeficientes de correlación de Spearman Para turbiedad máxima y dosis de coagulante y cloro (precloración y post-cloración) en eventos de alta turbiedad

		Turbiedad máxima del agua			Dosis		
		Cruda	Clarificada	Tratada	Coagulante	Cloro precloración	Cloro postcloración
Turbiedad máxima del agua	Cruda	1,00	0,23**	0,55*	0,87*	0,34*	0,30*
	Clarificada	0,23**	1,00	0,38*	0,18**	⊥	⊥
	Tratada	0,55*	0,38*	1,00	0,57*	⊥	⊥
Dosis	Coagulante	0,87*	0,18**	0,57*	1,00	⊥	⊥
	Cloro precloración	0,34*	^	⊥	⊥	1,00	⊥
	Cloro postcloración	0,30*	^	⊥	⊥	⊥	1,00

* Correlación significativa al 5 %; ** Correlación no significativa al 5 %; ⊥ correlación no evaluada

Fuente: (MONTTOYA, y otros, 2011)

Luego de hacer estudios comparativos por medio de la matriz de correlación para turbiedad máxima del agua, las correlaciones directas y significativas encontradas entre la turbiedad del agua cruda y las dosis de cloro indican que esta afecta linealmente la demanda de cloro en el agua tratada y cruda; esto nos quiere decir que toca hacerles un buen seguimiento a los procesos de pre cloración y post cloración (desinfección) observando la calidad microbiológica del agua tratada.

En cuanto al agua cruda, no se evidencian gran asociación lineal entre su turbiedad máxima y el agua clarificada, pero si se evidencia gran similitud con el agua tratada previamente.

Teniendo en cuenta que la filtración es la última etapa de remoción, se debe garantizar su eficiencia para mantener los patrones de calidad del agua potable.

En cuanto al agua tratada se evidencia que la planta cumple con los estándares de la norma nacional, aunque el 99.6% de los datos superan 0.3 UNT; límite máximo para USEPA.

“De los pocos datos que superan los límites de 1 y 2 UNT, alrededor del 60 % corresponden a eventos de alta turbiedad, ratificando que éstos afectan la calidad del agua potable y, por lo tanto, podrían ocasionar un incremento del riesgo microbiológico, considerando la relación directa entre la turbiedad y la concentración de microorganismos.” (MONTTOYA, y otros, 2011).

Como conclusión general de este artículo se puede decir que la turbiedad de la fuente de abastecimiento afecta de forma directa la eficiencia de los procesos convencionales de la planta, por esto se hace indispensable el realizar análisis de tipo estadístico experimental para poder mirar que proceso dentro de la planta es la más afectada, en este caso siendo la filtración; Pues ya que los problemas en la operación, como en la coagulación inadecuada, pueden comprometer las unidades de clarificación y esta vez afectando la eficiencia de la filtración.

Para la investigación en curso, la investigación anterior, proporciona información clave para el estudio estadístico y detallado del proceso de sedimentación, puesto que es la estructurada encargada de remover la mayoría de la turbiedad del agua, así como nos proporciona referencias de manejo de agua potable y como analizarla para saber si está dentro de la turbiedad óptima.

5.3. EVALUACION DE DOS CASOS DE ESTUDIO DEL FENOMENO DE SEDIMENTACION EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA

El presente artículo fue elaborado en el año 2009 para la Escuela Superior Politécnica del Litoral (Ecuador) el cual tiene como objetivo presentar una metodología adecuada de enseñanza de laboratorio de ensayos de sedimentación. Esta metodología se basa en ensayos de sedimentación establecidos previamente en literatura relacionada. (VILLACRECES, 2009).

En el artículo se dice; La sedimentación es una operación usada para el tratamiento de agua tanto residual como potable. Los parámetros de diseño de dichas estructuras se obtienen bajo ensayos realizados en columnas de sedimentación considerando aproximaciones teóricas. Las columnas de sedimentación usadas en estos ensayos varían de dimensiones dependiendo su función del tipo de análisis seguido.

El trabajo de investigación surge como necesidad de buscar alternativas para el desarrollo de la parte práctica de la teoría del agua. La Escuela no cuenta con laboratorios de tratabilidad del agua, debido a esta problemática se pensó

en adaptar los ensayos en este caso sedimentación a equipos normalmente utilizados en otra disciplina, como es el caso de la hidrometría en la mecánica de suelos.

En este ensayo se trabajarán 2 muestras: un agua residual artificialmente preparada y agua usada para el lavado de las Mixer.

Para el ensayo de sedimentación se usó el equipo hidrométrico utilizado en la determinación de granulometría de suelos, para la determinación de granulometría de suelos, con cilindros de diferentes diámetros y alturas.

La metodología de ensayo aplicada es referida por Tchobanoglous y Burton (1995) para evaluar sedimentación a diversas concentraciones de sólidos suspendidos. En el ensayo se registra la variación de la altura de la interface sedimento-agua con respecto al tiempo. La curva resultante y su posterior procesamiento ayudan a determinar los parámetros de diseño de un sedimentador apropiado para el tipo de agua analizada. El principio básico de esta curva es que la altura de la interface decrece pseudo-exponencialmente con el tiempo y, por ende, la velocidad de sedimentación.

5.4. EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL COMPORTAMIENTO DE LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN DE PARTÍCULAS

Esta investigación realizada por Gonzalo Salinas y Fernando Espinosa en la Universidad Técnica de Dresde, tiene por objeto presentar los elementos teóricos, la metodología, resultados y conclusiones de un trabajo desarrollado con el fin de determinar el comportamiento de la velocidad de sedimentación terminal de sistemas de partículas no coloidales de tamaño medio menor a 1.000 nm respecto de sistemas de partículas de tamaño mayor a este.

Los resultados alcanzados mostraron que existe una diferencia entre el comportamiento de la velocidad de sedimentación de sistemas de partículas mayores a 1.000 nm, respecto de los sistemas de partículas cuyo tamaño es menor a este, lo que impacta en el valor que adopta el factor de corrección.

Se dan como base La modelación físico - matemática que describe el proceso de sedimentación de partículas de un fluido se puede plantear a partir de un balance dinámico de fuerzas aplicado a una partícula única. Y la modelación clásica que permite determinar la velocidad terminal de sedimentación para una partícula no coloidal rígida, lisa de forma esférica, que sedimenta en un fluido viscoso del tipo newtoniano.

La magnitud de la reducción de velocidad en el surgimiento de las partículas depende directamente de la concentración volumétrica de partículas presentes en la suspensión. En el trabajo se manejaron partículas de 270 a 1560 nm de diámetro.

Entre los resultados de la investigación cabe destacar en la figura 5 (Comportamiento de los factores de corrección considerados y los valores experimentales obtenidos de la velocidad normalizada de sedimentación terminal, respecto de la porosidad de la suspensión) y en la tabla 3 (Exponentes experimentales y coeficientes de determinación obtenidos para la el factor de corrección de la velocidad terminal de sedimentación a partir de la aplicación la ley de la potencia) del documento, existe una directa relación entre el valor que adopta el exponente del factor de corrección a partir de la ley de la potencia, respecto del tamaño de las partículas que conforman el sistema de partículas que sedimenta.

De las conclusiones resaltamos que los valores del exponente del factor de corrección no son constantes, sino que dependen del tamaño promedio de las partículas que conforman el sistema presente en una suspensión y, por ende, del número de Reynolds del escurrimiento del fluido por sobre ellas.

Para el presente trabajo es importante saber que la porosidad (1) concentración volumétrica del sistema de partículas) y el efecto de superposición son factores que afectan la velocidad terminal de sedimentación.

5.5. COMPORTAMIENTO DE LA SEDIMENTACIÓN EN UN SISTEMA DE MICROPARTÍCULAS

Esta investigación realizada por Gonzalo Salinas Salas en la Universidad de Talca, Chile, tiene por objeto presentar presenta la determinación experimental del comportamiento de la velocidad de sedimentación de un sistema de micropartículas y a partir de los resultados ver si existe alguna diferencia entre el valor del exponente de la función de obstrucción determinado por Richardson y Zaki (1954), para el caso de sistemas de micropartículas no coloidales de orden de tamaño entre 1.500 nm y 200 nm, se describe además el comportamiento de dicho exponente.

Se describe el comportamiento del proceso de sedimentación de una micropartícula no coloidal rígida, asumiendo un régimen de escurrimiento laminar del fluido por sobre la esfera. Y para este comportamiento la velocidad terminal de sedimentación se describe como:

$$u_{Stokes} = \frac{(\rho_p - \rho_f) \cdot x^2 \cdot z \cdot g}{18 \cdot \mu} \quad (9)$$

Donde ρ_p densidad media de la partícula (kg/m³), ρ_f densidad media del fluido (kg/m³), x diámetro medio del sistema de micropartículas (m), g

aceleración de gravedad (m/s^2), z factor de aceleración (-); μ viscosidad dinámica del fluido (Pa·s).

Se aclara que el anterior formulamiento no considera el comportamiento de un sistema de micropartículas que sedimentan simultáneamente en un fluido, donde se genera una corriente en sentido opuesto al movimiento de las micropartículas, reduciendo así su velocidad de sedimentación terminal. A esto se debe sumar la existencia de fuerzas de carácter hidrodinámico que se manifiestan en la formación de puentes hidráulicos entre micropartículas, en el arrastre viscoso, en la succión que las micropartículas de mayor diámetro realizan sobre las de menor diámetro y por el cambio de impulso de las micropartículas que desarrollan una mayor velocidad sobre otras de menor velocidad.

La suma de todos estos efectos produce una significativa disminución en la velocidad de sedimentación terminal efectiva de un sistema de micropartículas. Esto dio lugar a la aparición de la denominada función de obstrucción (Fr) formulada como:

$$Fr = \frac{u_{\text{Sedimentación Efectiva}}}{u_{\text{Stokes}}} \quad (10)$$

Y fuerza es aplicada a la anteriormente descrita por Stokes.

Se estableció un modelo matemático para evaluar la función de obstrucción, el propuesto por Richardson y Zaki en 1954 de carácter semiempírico, Su forma matemática se representa a través de la ecuación:

$$Fr = (1 - c)^n \quad (11)$$

El valor del exponente de la función de obstrucción, según Richardson y Zaki para sistemas de micropartículas, es $n = 4,65$, independiente de su tamaño en régimen laminar.

Se procedió a hacer el experimento probando esta función de obstrucción para partículas de alrededor de 1000 nm y para sistemas de micropartículas de tamaño mayor a 1.000 nm, y como resultados se vio que claramente se ve la existencia de una función de obstrucción propuesto por Richardson y Zaki (1954) y los valores experimentales obtenidos de los ensayos realizados respecto a la porosidad de las suspensiones. Al respecto, cabe considerar que a medida que el tamaño de las partículas micrométricas existentes en las suspensiones disminuye, se genera un mayor número de partículas en ella a igualdad de concentración volumétrica. Esto produce que tanto la masa como el volumen individual de cada micropartícula decrezca a medida que disminuye su tamaño en una mayor proporción en comparación a su área exterior, lo que conduce a que disminuya la magnitud de las fuerzas

generadas por la acción de un campo mecánico de fuerzas, como el gravitatorio o centrífugo.

Se puede concluir que la función de obstrucción de velocidad de sedimentación, para el caso de sistemas de micropartículas del orden de tamaño micrométrico, requiere utilizar un exponente mayor al propuesto por Richardson y Zaki (1954), convencionalmente empleado ($n = 4,65$). A su vez, estos valores no son constantes, sino que dependen del tamaño medio de las micropartículas que conforman el sistema que sedimenta. El valor del exponente de la función de obstrucción se incrementa a medida que disminuye el tamaño de las micropartículas, esto puede llegar a aplicar a los ensayos que se realizaran y verse reflejados en el porcentaje de remoción del sistema de partículas.

5.6. SEDVEL: UN BALANCE BAJO EL AGUA PARA MEDIR LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN IN SITU Y SUSPENSIÓN DE SEDIMENTOS COHESIVOS CONCENTRADOS

El artículo trata principalmente de un instrumento automatizado: el SEDVEL (SEDVEL-Velocidad de Sedimentación) fue desarrollado para medir directamente la concentración y los medios de distribución de velocidades de asentamiento de las partículas en suspensión (SPM) in situ (en obra).

Este instrumento consiste en un equilibrio bajo el agua, que mide directamente la variación en el tiempo del peso sumergido de la materia en partículas (PM) se instala en una placa situada en la parte inferior de un tubo de sedimentación, en condiciones de inmovilidad. SEDVEL opera bajo el agua y las muestras in situ trabajan por períodos de despliegue de unos pocos días. Se observaron comportamientos de sedimentación distinta entre los dos sitios. Esta diferencia probablemente se da en una función del tamaño de grano inferior, la tensión de cizallamiento, la resuspensión, advección y el contenido orgánico de SPM.

En la introducción destacamos que se dice que la cuantificación de la cantidad de materia de las partículas en suspensión masa-concentración (SPM) y la velocidad de sedimentación son esenciales para el estudio de la sedimentación a corto y largo plazo y la calidad del agua. Además, la masa-concentración y el tamaño específico de velocidad de sedimentación de SPM son parámetros clave para el cálculo de la deposición en el modelo de advección-difusión aplicado para describir el transporte de masa de sedimentos cohesivos (Mcanally y Mehta, 2001; Baugh y Manning, 2007).

La lectura de la balanza SEDVEL está influenciado por dos factores principales: (i) la homogeneidad del material sedimentado en el platillo que afecta a la precisión de la balanza y, (ii) la partida que adopten con la posición cero (ZP). Los experimentos de laboratorio han demostrado que una

distribución de partículas homogénea se consigue normalmente en la parte inferior del tubo (Mantovanelli, 2005).

Varios pasos están involucrados en el análisis de datos de salida SEDVEL: (i) la determinación de la ZP, (ii) convertir la salida del sensor en bruto en masa sumergida eficaz, (iii) el ajuste de una curva a los puntos de medición y la extrapolación de la curva a cero, (iv) el cálculo de la masa en seco y la concentración de SPM y (v) el cálculo de la distribución masiva de la solución de las velocidades sobre la base de las masas sumergidas eficaces.

El SEDVEL ya fue puesto a prueba en campo, en la bahía de Cleveland en Townsville (Australia) y determino que el sedimento del fondo alrededor de la punta Pier (50 m offshore) se compone principalmente de arena (77,4%) y limo (22,3%), con una disminución de la fracción de limo (2,2%) y un aumento de la arena (97,6%) cerca de la playa (Müller, 2002).

El comportamiento in situ de la solución de sedimento cohesivo es compleja y depende de un gran número de factores y de las interacciones entre ellos, tales como: el tamaño, la densidad y el contenido orgánico de los flóculos, la concentración de SPM, cizallamiento turbulento, grado de agregación, inter-interacciones de partículas, la salinidad y la temperatura (Kranck, 1986; Hamm y Migniot, 1994). Los anteriores son factores a tener en cuenta en el análisis de la sedimentación en la torre, tales como el tamaño de las muestras a sedimentar, su densidad y la interacción que tengan estas partículas.

Hasta la fecha SEDVEL es un dispositivo único que permite directa y automatizada mediciones in situ de la masa sumergida eficaces y concentraciones de material particulado tanto en ambientes de agua dulce y de agua salada. De los problemas que presenta este instrumento son las vibraciones en el tubo o columna que podrían agitar las partículas y alterar los resultados de la sedimentación, en el presente trabajo de la columna de sedimentación al no tener partes electrónicas este problema no es presente.

5.7. REMOCIÓN DE TURBIEDAD EN AGUA DE UNA FUENTE NATURAL MEDIANTECOAGULACIÓN/FLOCULACIÓN USANDO ALMIDÓN DE PLÁTANO

Este proyecto realizado en la Universidad Industrial de Santander, Colombia, por un grupo de alumnos de la misma, tiene como fin analizar la remoción de turbiedad en agua proveniente de una fuente natural, mediante coagulación/floculación, usando almidón de plátano. Mediante el test de jarras se comprobó que el almidón de plátano muestra ser adecuado como ayuda de floculación, aunque se presentó una sedimentación lenta. La mejor eficiencia de remoción de turbiedad se obtuvo para los siguientes valores de los factores: pH de 5, 50:50 porcentaje en peso de la combinación sulfato de

aluminio/almidón de plátano, velocidad de mezcla rápida de 150rpm, velocidad de mezcla lenta de 20rpm.

En el presente trabajo se realiza un estudio por prueba de jarras para tratar una muestra de agua tomada de una fuente natural de agua del sector El Cerro de Oro de la ciudad de Manizales (Colombia), cerca de la entrada a la planta de potabilización de agua de Niza. Se utilizó sulfato de aluminio como coagulante y almidón de plátano como ayudante de floculación.

El proceso inicia con la operación del agitador múltiple, con una velocidad de agitación rápida, y se agrega la combinación prevista de sulfato de aluminio con almidón de plátano. Cuando se alcanza el tiempo de mezclado rápido, que es de un minuto, la velocidad del agitador se reduce al valor de mezclado lento. Cuando se alcanza el tiempo de mezclado lento, la operación del agitador es detenida, para favorecer la precipitación de los flóculos. Cuando se completa el tiempo de sedimentación, es decir 20min, se mide nuevamente la turbiedad. Se realiza una réplica a cada experimento.

En los resultados obtenidos según observaciones visuales, el almidón de plátano demora mucho tiempo en sedimentarse. Sin embargo, muestra capacidad de servir como coadyuvante de floculación. También se observó que el factor más relevante que produce cambios radicales en la turbiedad es el gradiente de mezcla lenta, encontrando que se encuentran bajas turbiedades en altos valores del gradiente de mezcla lenta.

Se concluyó mediante las observaciones realizadas en las pruebas de jarras y los datos de turbiedad, que el almidón de plátano utilizado es efectivo como ayudante de floculación, cuando se usa sulfato de aluminio líquido. Se observó que el sulfato de aluminio debe de agregarse diluido en lugar de granulado, teniendo en cuenta que los experimentos con sulfato de aluminio granulado generaron unos datos que no fueron adecuados para análisis estadístico. La velocidad de mezcla lenta está relacionada con la adsorción entre los coloides, lo que comprende el contacto entre las partículas en pro de la formación de flóculos. Un valor muy alto genera el rompimiento de los flóculos, mientras que un valor muy bajo genera ausencia de contacto entre las partículas y por tanto ausencia de formación de flóculos.

6. DISEÑO GENERAL DEL PROTOTIPO

“El proceso de diseño involucra la organización de los procesos creativos y analíticos utilizados para satisfacer una necesidad o resolver un problema.” (Ortega, 2001)

En el desarrollo del prototipo se hizo uso del diseño de ingeniería concurrente. Esta metodología involucra la coordinación de funciones técnicas y no técnicas del diseño y la manufactura dentro de una organización.

Este criterio de diseño se divide en 3 partes

Ideación: Identificación del problema, Ideas preliminares y diseño preliminar

Refinamiento: Modelado, análisis de diseño, visualización de diseño

Implantación: Construcción, planificación y documentación.

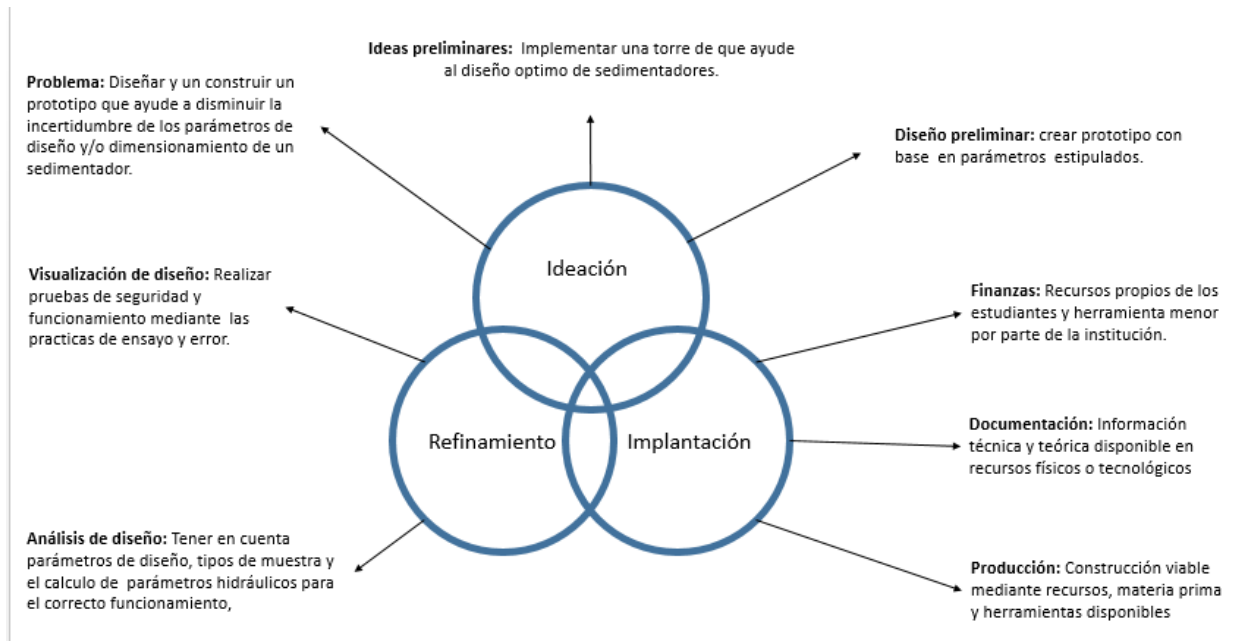
En la parte de ideación se consideró el problema a resolver, que es la necesidad de disminuir la incertidumbre en los parámetros de diseño y/o dimensionamiento de un sedimentador.

Para llegar al diseño preliminar se tomó en cuenta la etapa de refinamiento que tiene que ver con el diseño físico del prototipo y la etapa de implantación, en el cual está incluido al aspecto de financiamiento o recursos disponibles para construir el prototipo.

En la etapa de refinamiento, se desarrolló en la parte de pruebas con el método de ensayo y error. Como en el cálculo de parámetros hidráulicos para el correcto funcionamiento de la estructura.

En la parte de implementación, se analizó el conjunto de herramientas digitales y físicas las cuales servirán como base para el desarrollo del proyecto como también la selección de los materiales apropiados para que el fuera económicamente viable. Como ejemplo la implementación de un sistema de aire a presión para mantener la muestra en continuo movimiento. En la figura 7. Se muestran algunos aspectos claves para el diseño concurrente del equipo.

Figura 7. Diseño concurrente del prototipo



Fuente: Autores

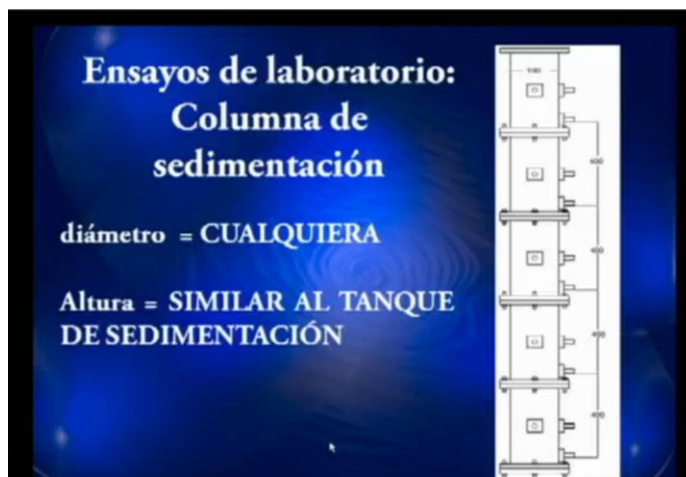
6.1. APLICACIÓN DEL PROTOTIPO.

La aplicación de este prototipo será en los laboratorios de plantas de tratamiento de aguas de la Universidad Católica de Colombia, Además la universidad podrá brindar el servicio a entidades municipales y departamentales para que puedan realizar sus estudios. Ya que es un dispositivo que funciona con muestras de agua potable y agua residual. Actualmente en el laboratorio de la universidad no es posible realizar algún tipo de estudio dedicado a la sedimentación, pero si cuenta con los demás estudios previos a la sedimentación.

6.2. DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES DEL EQUIPO.

Actualmente no se cuenta con reglamentación alguna para el diseño de una torre o columna de sedimentación. Varios autores como Camp han optado por manejar alturas promedio entre 150 cm y 200 cm de altura varían de igual forma el diámetro del tubo, la sección debe ser circular de tal manera que se puedan evitar zonas muertas. El diámetro puede variar entre 10 cm y 20 cm, pero no podría ser menor por lo que generaría un taponamiento por la muestra (floc). Las distancias entre los puntos de toma de muestra pueden variar entre 15 cm. y 30 cm.

Figura 8. Parámetros de diseño de una columna de sedimentación



Fuente: (López Pérez, 2010)

6.3. DIMENSIONAMIENTO DE EL PROTOTIPO

6.3.1. Estructura

Se contemplaron los criterios mencionados en la figura 8. Como también, algunos bocetos ya antes realizados para el diseño de una torre y/o de sedimentación. Se definió una altura total de 200 cm, para simular la altura promedio de un sedimentador convencional, un borde libre de 10 cm, un diámetro de 20 cm en el cuerpo de la estructura.

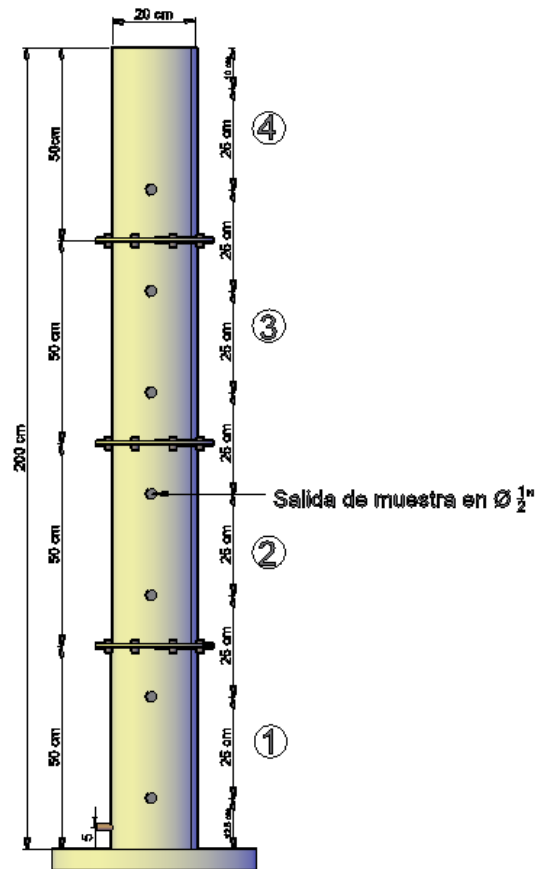
La estructura fue dividida en 4 elementos de igual altura y diámetro unidas por bridas. Esta decisión se obtuvo al analizar algunos factores como:

- **La esbeltez:** debido a que la relación sección transversal-altura hace que la estructura sea inestable o que requiera bastante refuerzo en la base. Las bridas ayudan a distribuir de mejor manera los esfuerzos generados por las fuerzas hidrostáticas e hidrodinámicas. Como también evitan deformaciones en algunos puntos de la estructura.
- **Mantenimiento:** Puesto que va ser una estructura que en su fondo se depositaran solidos debido a las prácticas de laboratorio, se desarticulara por medio de las bridas para facilitar la limpieza de la base y en general del prototipo.

- **Futuras averías:** La estructura puede fallar debido a la falta de mantenimiento y al cambio invariable en los esfuerzos a la que está sometida al largo de su vida útil, por lo que, si se llega a dañar una zona que no comprometa toda la estructura, puede ser reemplazada sin necesidad de gastar dinero.

Las salidas para la toma de muestras se diseñaron de forma equidistantes, de esta manera los elementos 1,2,3 tienen 2 salidas de muestras, mientras el elemento 4, solo 1 salida. Estas estarán separadas a 25 cm una de la otra desde el eje de cada una, estas salidas tienen un diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada como se muestra en la Figura 9.

Figura 9. Bosquejo general de la estructura

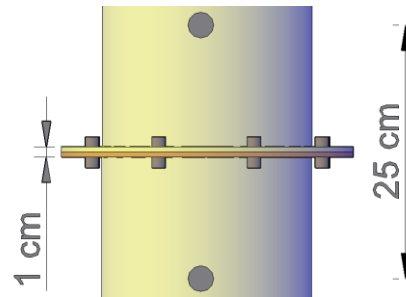


Fuente: Autores

6.3.2. Brida

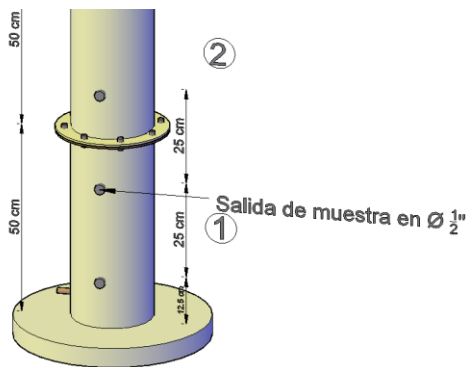
Para unir los elementos de la columna se diseñaron unas bridas. Estas “ayudan a que las tuberías puedan ser desmontadas sin la intervención de una operación destructiva; esto mediante a su diseño circular con pequeños agujeros en los cuales se colocan pernos de unión” (QuimiNet, 2012). El diámetro exterior será de 22,5 cm y el diámetro interno, será igual al diámetro de la estructura en este caso 20 cm. Al tratarse de una estructura que maneja presión hidrostática, por cuestión de refuerzo y hermeticidad se implementaron 8 agujeros distribuidos uniformemente para introducir pasas y/o tornillos que permitirán una unión rígida y hermética entre los elementos de la estructura. El diámetro de estos será de 1/8 de pulgada. La altura total de las bridas es de 1 cm contemplando 0,4 cm del empaque de seguridad que está entre ellas. En la figura... se muestra el detalle de la unión bridada entre el elemento 1 (base) y elemento de 2. En la figura se muestra la altura de la brida con el empaque de seguridad.

Figura 10. Detalle de Brida para prototipo



Fuente: Autores

Figura 11. Vista isométrica Para el elemento 1



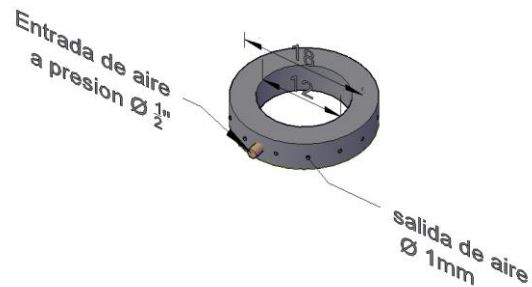
Fuente: Autores

6.3.3. Anillo de aire

Se implementó el diseño de un sistema que mantendrá la muestra en constante turbulencia; consistió en un anillo con aberturas laterales, esto con el fin de que salga aire presurizado por las aberturas laterales que se distribuirán en el perímetro del anillo, permitiendo el paso del aire y dejando que las bolsas o burbujas de aire mantengan en constante movimiento el agua. Las dimensiones del anillo son:

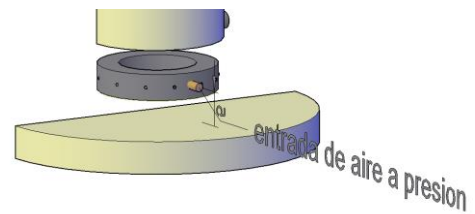
- 18 cm diámetro exterior
- 12 cm diámetro interior
- 4 cm de altura
- 5 cm desde la base o parte 1

Figura 12. Detalle Anillo



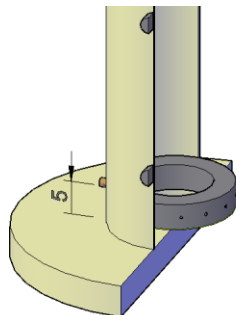
Fuente: Autores

Figura 14. Anillo de la estructura.



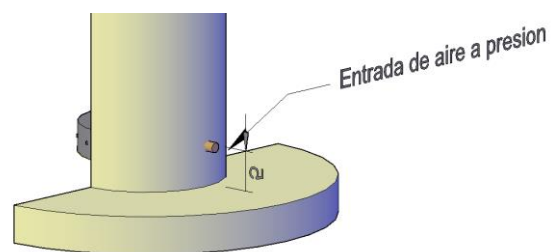
Fuente: Autores

Figura 13. Anillo dentro del dispositivo



Fuente: Autores

Figura 15. Detalle entrada de aire



Fuente : Autores

6.4. CARACTERISTICAS FISICAS Y MATERIALES

Para la selección del material se tuvieron en cuenta algunas propiedades físicas. Estas “son aquellas que la materia muestra por sí misma sin cambiar a otra ni por la interacción con otra sustancia, es decir una propiedad física se puede medir y observar sin que se modifique la composición o identidad de la sustancia. Algunas propiedades físicas son color, punto de fusión, conductividad eléctrica, dureza, tenacidad y densidad. Un cambio físico ocurre cuando una sustancia altera su forma física, no su composición. Un cambio físico resulta en diferentes propiedades físicas”. (Silberberg, 2002). Esta base Teórica es de suma importancia, puesto que la estructura estara sometida a presiones hidrostáticas las cuales tendrá que soportar el material empleado.

6.4.1. CALCULO DE PROPIEDADES FISICAS

En primera instancia se calculo el Area de la estructura:

$$A_c = (\pi \times r^2) + (2\pi \times r \times h) \quad (12)$$

Donde r es el radio del cilindro y h es la altura de la estructura.

Haciendo uso de la ecuación (12) se obtiene:

$$A_c = (\pi \times (10 \text{ cm})^2) + (2\pi \times 10 \times 200 \text{ cm}) = 12880 \text{ cm}^2 \rightarrow 1.28 \text{ m}^2$$

Esta area solo corresponde a el cilindro central de la estructura.

- Para el area de la base

$$A_b = (\pi \times r^2) \quad (13)$$

Haciendo uso de la ecuación (13) se obtiene:

$$A_b = (\pi \times (25 \text{ cm})^2) = 1963 \text{ cm}^2 \rightarrow 0.196 \text{ m}^2$$

- Para las bridas

$$A_{br} = (\pi * r_M^2) - (\pi * r_m^2) \quad (14)$$

Donde r_M es el radio mayor del anillo; r_m es el radio menor del anillo y h_m

Haciendo uso de la ecuación (14) se obtiene:

$$A = (\pi * (11.25 \text{ cm})^2) - (\pi * (10 \text{ cm})^2) = 83.44 \text{ cm}^2$$

Bridas totales = 3Und. ; Area total: $83.44 * 3\text{Und.} = 250 \text{ cm}^2 \rightarrow 0.0250 \text{ m}^2$

De esta forma el area total para el cuerpo de la estructura es

$$A_t = A_c + A_b + A_{br} \quad (15)$$

Haciendo uso de la ecuacion (15) se obtiene

$$A_t = 12.880 \text{ cm}^2 + 1963 \text{ cm}^2 + 250 \text{ cm}^2$$

$$A_t = 15093 \text{ cm}^2$$

Se procede a calcular el volumen de la estructura.

$$V = (\pi_M * r_M^2 * h_M) - (\pi_m * r_m^2 * h_m) \quad (16)$$

Donde h_M es la altura del radio mayor anillo y h_m es la altura del radio menor del anillo.

Haciendo uso de la ecuacion (16), Se obtiene.

$$V = (\pi_M * (10.3 \text{ cm})^2 * 200 \text{ cm}) - (\pi_m * (10 \text{ cm})^2 * 200 \text{ cm})$$

$$V = 3826 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Volumen del cilindro estructural sin brida}$$

Volumen de la brida:

$$V = (\pi_M * r_M^2 * h_M) - (\pi_m * r_m^2 * h_m)$$

$$V = (\pi_M * (22.5 \text{ cm})^2 * 0.6 \text{ cm}) - (\pi_m * (20 \text{ cm})^2 * 0.6 \text{ cm})$$

$$V = 200.30 \text{ cm}^3$$

El Volumen total de el cuerpo sera de

$$V_c + V_b = 3826 \text{ cm}^3 + 200.30 \text{ cm}^3 = 4026.3 \text{ cm}^3$$

Se procede a evaluar el volumen de muestra que contendra el dispositivo.

$$V = \pi * r^2 * h \quad (17)$$

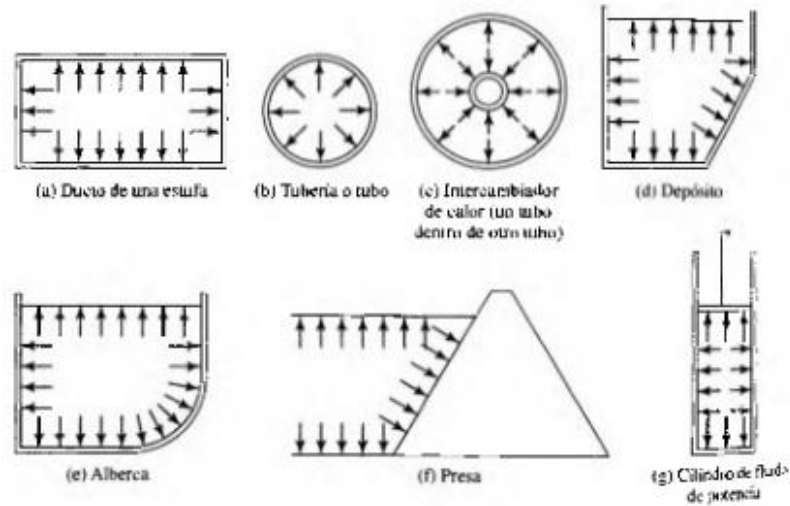
Haciendo uso de la ecuacion (17) Se obtiene

$$V = \pi * (10 \text{ cm})^2 * 200 \text{ cm} = 59690.26 \text{ cm}^3 \rightarrow \text{Volumen de muestra}$$

El parametro fisico mas importante a evaluar para a la hora de diseñar es la presion debida a un fluido. Esta presion "se transmite con igual intensidad en todas las direcciones y actua normalmente a cualquier superficie plana. En el mismo plano horizontal, el valor de la presion de un liquido es igual en cualquier punto." (Guiles, y otros, 1994). En el caso planos Verticales se hace

presión a las paredes. En la figura 16. se muestra la distribución de fuerzas en las superficies.

Figura 16. Distribución de fuerzas en superficies



Fuente: (Mott, 2006)

La presión Hidrostática depende de la densidad(ρ), la gravedad(g) y la profundidad(h) del lugar donde medimos la presión (P). Para el caso de la torre de sedimentación, es necesario evaluar este fenómeno físico debido a que la estructura soportará dicha presión; además de calcular los puntos de muestra para identificar que los accesorios que permiten el paso de la muestra, cumplan con el requisito mínimo de presión.

Se calculó las presiones críticas dentro del modelo .

$$P = \gamma \times h \quad (18)$$

Donde γ es la densidad específica del fluido y h la altura hasta la lamina de agua.

Para el caso de la densidad específica usada en los cálculos, es necesario saber que el agua estará mezclada con algunos materiales granulares; por ello se hizo un análisis probabilístico en el que se coge la densidad específica del agua a una temperatura de 5°C (9806 N/m^3) y la densidad específica de la arena (material más denso dentro de las muestras) con una densidad de 19600 N/m^3 y se hará un promedio de las densidades para un caso extremo donde haya $\frac{1}{2}$ parte de cada material.

$$dp = \frac{9806 \text{ N/m}^3 + 19600 \text{ N/m}^3}{2} = 14701 \text{ N/m}^3$$

Luego de obtener el valor de densidad especifica se procedio a calcular la presion en cada uno de los puntos de forma ascendente.

Haciendo uso de la formula (18) para calcular la presion de fondo se obtiene que:

$$Pf = 14701 \text{ N/m}^3 \times 1.90 \text{ m} = 27932 \text{ N/m}^2 = 27932 \text{ Pa.} = 27.931 \text{ kPa.} \\ = 4.05 \text{ PSI}$$

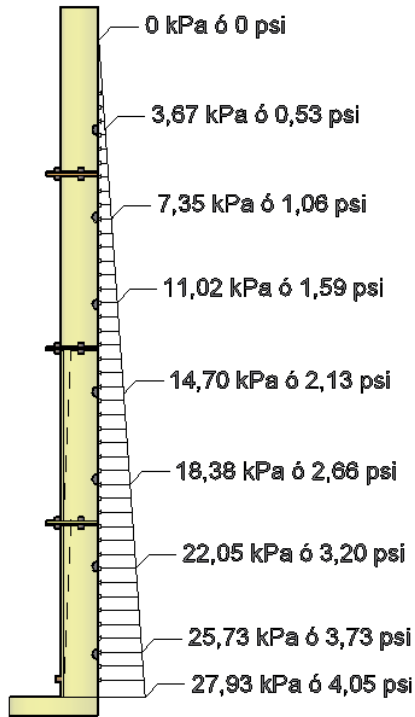
Tabla 4. Presiones en cada uno de los puntos a evaluar.

Punto	Peso especifico (N/m ³)	h (m)	Presion = Y * h Pascales (N/m ²)	KiloPascales (kN/m ²)	Psi (lb/pulg ²)
Fondo	14701	1.90	27932	27,93	4,05
Entrada de Aire	14701	1.85	27196,85	27,20	3,94
Toma de muestra 1	14701	1.75	25726,75	25,73	3,73
Toma de muestra 2	14701	1.5	22051,5	22,05	3,20
Toma de muestra 3	14701	1.25	18376,25	18,38	2,66
Toma de muestra 4	14701	1	14701	14,70	2.13
Toma de muestra 5	14701	0.75	11025,75	11,02	1,59
Toma de muestra 6	14701	0.5	7350	7,35	1,06
Toma de muestra 7	14701	0.25	3675,25	3,67	0,53

Fuente: Autores.

En la figura 17. se muestra la distribución de presión en la pared de la estructura y la magnitud del valor en cada uno de los puntos de toma de muestra.

Figura 17. Distribución de presión hidrostática en la pared de la estructura.



Fuente: Autores

En el fondo se produce una presión distribuida como se muestra en la figura 18.

Figura 18. Distribución de fuerzas en el fondo de la estructura



6.5. SELECCIÓN DEL MATERIAL DE LA ESTRUCTURA

La estructura ó cuerpo es la que se encargara de contener las diferentes muestras que se analizaran en un tiempo (no menor a una hora), por lo que el factor economico no es el más importante a la hora de determinar selección del material. Tambien es importante tener en cuenta la comidad de dezplazamiento o el transporte del prototipo dentro de las instalaciones del laboratorio entre otros.

El vidrio procesado y las laminas de acrilico fueron los materiales mas convenientes a la hora de pensar en la construcción. Aunque el vidrio Procesado ofrece ventajas economicas frente al acrilico, el acrilico es mas resistente a golpes comparando con una lamina de cristal del mismo grosor, ademas de ser mas liviano.

En la tabla 5. se muestra una comparacion entre la resistencia al impacto entre el acrilico y el vidrio. Al ser una estructura esbelta puede sufrir colisión, lo que hace que miremos esta especificacion.

Tabla 5. Resistencia al Impacto de Lámina de acrílico comparada con la de vidrio de diferentes tipos.

Material	Espesor en mm	Peso de Bola de Acero en caída libre en kg	Energía necesaria para romper el material en libras-pies
Lámina de Acrilico	2.5	0.11	3.0
	3.0	.91	4.7
	4.5	.91	11.1
	6.0	2.27	18.1
Cristal de Ventana	2.5	.11	0.8
Cristal Doble Resistencia	3.2		1.8
Cristal Flotado	4.8		2.0
	6.4		1.0
Vidrio de Seguridad Laminado	6.4	.11	1.1
Rough Wire Glass, impacto sobre lado áspero			2.2
Rough Wire Glass, impacto sobre lado liso			0.2
Wireglass pulido			0.4

Fuente: (policarbonato, 2013)

Por comodida, se empleo laminas de acrilico transparente como material base. Se analizaron algunas propiedades fisicas importantes para la construccion de la torre; entre ellas: Volumen,densidad, masa, Color, resistencia mecanica.

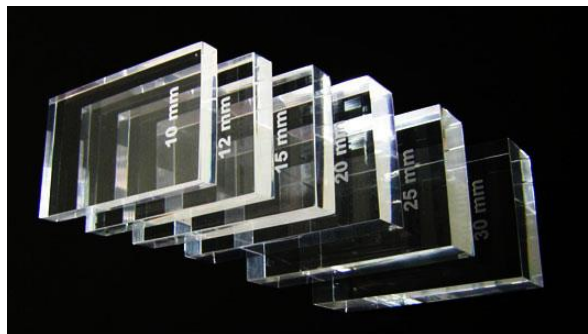
✓ ACRILICO

La lámina acrílica es un material termoplástico ampliamente utilizado por su estética y alta claridad, considerando como el mejor de los plásticos transparentes destinados a ser usados en la intemperie. El acrílico es uno de los plásticos de mayor aceptación en los mercados de cubiertas, publicidad, decoración, avisos luminosos, etc.

PROPIEDADES FÍSICAS

- Transmisión de la luz del 92-95% (trasparencia que es superior a la del vidrio).
- Densidad: 1.18 g/cm³
- Extraordinaria resistencia al medio ambiente, excelente resistencia a la degradación por rayos ultravioletas.
- No se opaca con el tiempo.
- Larga vida útil.
- Facilidad para el termo- formado: sometiéndole a temperaturas entre 140 a 180°C
- Máxima temperatura recomendada para servicio de exposición continua 65 a 90°C
- Mínima temperatura recomendada para servicio o exposición continua -40°C.
- Baja resistencia a la abrasión
- Fácil limpieza (Acrilux, 2013)

Figura 19. Láminas de acrílico en varios calibres.



Fuente: (Acrilux, 2013)

Luego, se calculara el volumen de fluido que puede llegar a contener el recipiente.

Paso seguido, se calulo la masa total del equipo.

La lamina de acrilico posee una densidad de 1.18 g/cm^3 descrita en las propiedades fisicas.

$$m = \rho * V \quad (19)$$

Donde ρ es la densidad del material y V el volumen del recipiente. $m = 1.18 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3} \times 4026.3 \text{ cm}^3 = 4751.034 \text{ gr}$

6.6. SELECCIÓN DE LOS RESGISTROS PARA TOMA DE MUESTRAS

Estos permiten el paso de las muestras en cada una de las 7 ranuras. Para ello se usaron Valvulas de Bola.

Entre las opciones se encontraron valvulas de PVC y valvulas cromadas, por lo que se eligieron valvulas de PVC al ser mas livianas,mas economicas y cumplir el requisito minimo de presion en el fondo con capacidad de resisitir 235 psi de presion cuando la configuracion de esta solo pide como maximo 4.05 psi como se muestra en la Figura 17 . En la figura 19. se evidencia una comparativa de precios entre valvulas de bola, Admisibles para el proyecto.

Figura 20. Válvulas de bola para prototipo.

			
Válvula bola rosca 1 pulgada agua manija larga,...	Válvula pvc 1/2 pulgadas ros cada 235 psi	Válvula bola rosca 1/2 pulgada agua manija larg...	Válvula bola 1/2 rosca hembra/macho agua manija...
SKU:204041	SKU:120945	SKU:204040	SKU:204047
Precio normal:	Precio normal:	Precio normal:	Precio normal:
\$40.900	\$4.900	\$19.900	\$29.900

Fuente: Easy Cencosud

Solo para este caso se tendra en cuenta el peso de las valvulas de paso de muestra y los adaptadores macho , puesto que es una masa adicional que se le agragara a la estructura.

Para este procedimiento se hizo uso de una balanza de precisión.

Cada válvula tiene un peso promedio de 69.38 g como se muestra en la figura 20., por lo que las 8 válvulas que tendrá la estructura le sumaría un total de 555.3 g. mientras los adaptadores macho pesan 11.63 gr cada uno (Figura 21), siendo un total de 14 de estos estos le suman un total de 197g de peso a la estructura.

Figura 21. Peso Válvula en balanza



Fuente: Autores

Figura 22. Peso de adaptador macho



Fuente: Autores

6.7. SELECCIÓN DE EMPAQUES Y PASES PARA BRIDAS.

El caucho con centro de lona fue el material adecuado para el sello entre los elementos de la estructura. Las Características físicas que ofrece este material son adecuadas para generar una superficie hermetica total en el prototipo. En la tabla 5151 se muestra algunas de sus propiedades.

Las lonas que llevan dentro ofrecen flexibilidad sin deformar el caucho. De esta manera permite que el caucho no se deforme permitiendo filtraciones dentro del sistema.

Tabla 6. Propiedades Físicas del Caucho.

Propiedades Físicas	Generales Temperatura Ambiente	Rango de Dureza (Sh)	40 a 85 ShA	Altas Temp.	Envejecimiento a 100° C	Pobre-Buena	
		Resistencia a la Tracción Máx. (Kg./cm ²)	300		Elasticidad a 100° C	Buena	
		Alargamiento de Rotura Máx. (%)	650		Resistencia a la Llama	No Usar	
		Deformación Permanente por Compresión	Excelente		Bajas Temperaturas	Temperatura de Rigidez (°C)	-30 a -45
		Resiliencia	Excelente			Punto de Vidrio (°C)	-65
	Resistencia Eléctrica	Excelente					
	Mecánicas Temp. Ambiente	Resistencia a la Flexión	Buena-Excelente				
		Resistencia a la Abrasión	Buena				
		Resistencia al Desgarre	Excelente				
		Resistencia al Impacto	Excelente				

Fuente: (blogspot.com.co, 2011)

En la figura 22. Se muestra el empaque que se adaptó en la unión de los elementos de el modelo , se muestra los agujeros que permitieran el paso de los tornillos que finalmente generaran un sello adecuado por medio de la presión entre los tornillos, la estructura y el caucho.

Los tornillos que se usaron en la brida son tipo bristol con 1/8 de pulgada de diámetro, en acero inoxidable. Estas están acompañadas de arandelas las cuales permiten distribuir la presión de los tornillos en una mayor área dentro de la brida

Figura 23. Empaque de caucho para brida



Fuente: Autores

Figura 24. Tornillos Bristol Inoxidables



Fuente Autores

6.8. SELECCIÓN DE MANGUERA Y VALVULA REDUCTORA PARA AIRE

Se hizo uso de un compresor de aire con capacidad de 40 lb de presión. Ubicado en el laboratorio de suelos de la Universidad Católica de Colombia. La cual conecta directamente con tubería de hierro galvanizado a el laboratorio de plantas. El aire del compresor se distribuirá dentro del anillo de acrílico y así mismo mantener las partículas en movimiento. Por motivos de comodidad y transporte dentro del laboratorio se usó una manguera transparente (figura tal) que conectará a la válvula reductora de aire con la tubería que llevará el suministro de aire.

Figura 25. Manguera de paso de aire



Fuente:Autores

Figura 26. Válvula de cobre para paso de aire



Fuente:Autores

6.9. SELECCIÓN DE MUESTRAS PROBLEMA

El material seleccionado fue arena obtenida de cantera. Al ser un material que ha pasado por procesos de erosión y arrastre crean un canto rodado “adquiriendo una morfología más o menos redondeada, subredondeada u oblonga, sin aristas y con la superficie lisa, debido al desgaste sufrido por los procesos erosivos durante el transporte, generalmente causados por la corrosión o las corrientes de agua.” (Acevedo, 2014)

Esta forma esferica es la ideal para evaluar particulas discretas según lo visto en el capitulo de fundamento teorico, cuando se sustenta la forma ideal de una particula sedimentable.

La norma usada fue la I.N.V. 123 DEL 2007 d el cual tiene como objetivo “El análisis granulométrico tiene por objeto la determinación cuantitativa de la distribución de tamaños de partículas de suelo.” (INVIAS, 2007)

Se tomaron varias muestras en recipientes y se pusieron a secar por 24 horas (figura 26); Este procedimiento se realizó para permitir que las partículas que quedan pegadas por la humedad puedan separarse y permitir un tamizado eficiente. Luego del secado, se procedió a tamizar las muestras de arena con los tamices #100, #200 como se observa en la figura 27.

Figura 27. Secado de muestra



Fuente: Autores

Figura 28. Tamices #100, #200 y fondo



Fuente: Autores

De este procedimiento se obtuvieron 3 productos, lo que se retiene en el tamiz #100, #200 y fondo (figura 28), estos productos son apropiados, puesto que sus

diametros son menores a 1 mm y pueden decantarse de forma lenta, para apreciar su proceso de sedimentacion.

Figura 29. Muestras de arena con diferentes diámetros



Fuente: Autores

Para realizar los ensayos de sedimentacion, fue necesario analizar las muestras extraidas, antes de probarlas en la estructura. Por ello, se disolvieron 1 gramo y 3 gramos de la muestra en un litro para mirar que relacion aproximada tienen.

Tabla 7. Turbiedad para determinación de concentración.

Concentración en 1 L Tamiz	Turbiedad (UNT) 1g	Turbiedad (UNT) 3g	Relacion (turbiedad 3g/turbiedad 1g)
#100	9.73	29.5	3.031
#200	8.56	25.3	2.95
<200	132	386	1.91

Fuente: Autores

Se determino trabajar con un rango entre 20 y 60 UNT. Puesto que se podria considerar una muestra de alto riesgo para el consumo.

7. MONTAJE DE LA TORRE Ó COLUMNA DE SEDIMENTACIÓN

- En primer lugar, se colocaron las válvulas de bola en cada elemento de la estructura, para permitir un sello eficiente, se usaron empaques de caucho para poder comprimir bien la válvula y el adaptador macho. (figura 29.) (Figura 30.)
- El segundo paso fue adaptar el sistema de aire en la base de la estructura. Se utilizó Silicona industrial para poder ajustar el anillo de aire en la ranura. (Figura 31)
- De igual manera se pegó los empaques de caucho con centro de lona de las bridas con cada elemento, se efectuó pensando en reducir posibles filtraciones de agua por esta zona. (Figura 32.)
- Luego de ajustar y verificar el estado de cada elemento individual (figura 33), se procedió a juntar los elementos formando solo una unidad. Para ello se ajustaron los tornillos inoxidables con ranura Bristol de 3/8" (Figura 34.).
- Luego del ensamble. se realizó una prueba de estanquidad por 24 horas. Para comprobar posibles fugas y/o filtraciones. (Figura 35.). Finalmente se realizó una prueba con el sistema de aireación para observar cómo se comportaba el sistema (figura 36).

Figura 30. Empaque y adaptador macho



Fuente: Autores

Figura 31. Unión de válvula a la estructura



Fuente: Autores

Figura 32. Ensamble Anillo de Aire



Fuente: Autores

Figura 33. Ajuste de Caucho para brida



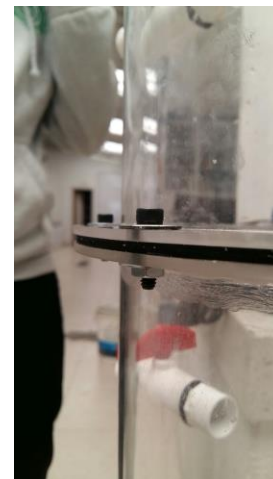
Fuente: Autores

Figura 34. Elementos verificados



Fuente: Autores

Figura 35. Detalle atornillado



Fuente: Autores

Figura 36. Prueba de estanqueidad



Fuente: Autores

Figura 37. Llenado y aireación



Fuente: Autores

8. PRUEBAS Y RESULTADOS DEL PROTOTIPO

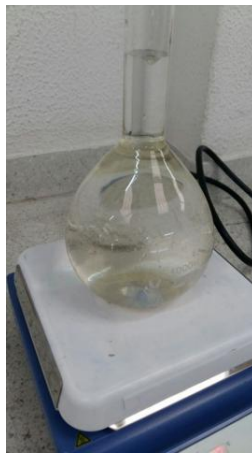
8.1. LABORATORIO DE DENSIDAD ESPECÍFICA

Este laboratorio es de suma importancia por lo que determina uno de los parámetros más importantes para la evaluación de la sedimentación de las partículas. La gravedad específica; esta se define como, "es la relación entre la masa de las partículas de suelo y el volumen que ocupan. Este concepto excluye el volumen del espacio poroso que existe entre las partículas sólidas." (NARRO, 1994).

Para determinar el valor de la gravedad específica, fue necesario acudir a la norma Invias 128 del año 2013. Esta norma tiene como objeto "determinar la gravedad específica de los suelos y de la llenante mineral (filler) por medio de un picnómetro." (INVIAS, 2007).

El Primer procedimiento es calibrar el picnómetro que se va a usar para el ensayo. Para Calibrar se necesitó llenar el picnómetro hasta el menisco y colocarlo a baño maría; Este procedimiento se usa para mirar cuanto cambia el peso del picnómetro más agua a diferentes temperaturas (Tabla 9) Posterior a este se realiza la gráfica de calibración, en el cual debemos determinar el peso del picnómetro más agua a la temperatura que se haya realizado el ensayo.

Figura 38. Figura tal. Calibración del picnómetro



Fuente: Autores

Tabla 8. Calibración de picnómetro.

T°C	Peso (g)
20	638,3
25	637,5
30	637,2
35	637
40	636,6

Fuente: Autores

Paso seguido a la calibración, consistió en sacar una muestra de las arenas a emplear en el procedimiento. Se destinaron 23 g de muestra retenida en el tamiz # 100, 23 g de muestra retenida en el tamiz #200 y 23 g de pasa tamiz #200, sacando un promedio de las tres y usándolas en todos los ensayos como densidad única. Esta muestra se tuvo que dejar por 24 horas en el horno para dejarlas totalmente secas.

De esta manera ya tenemos el dato de peso seco de la muestra

$$M_s = 69 \text{ g}$$

Luego se vierte la muestra en el picnómetro. Puesto que la muestra al revolverse con agua atrapa aire, fue necesario cebarla, para ello se colocó la muestra en un baño maría a una temperatura de 25°C por media hora, realizando a la vez movimientos manuales para permitir que el aire atrapado salga, (Figura tal) como lo indica la norma 128 de invias.

Figura 39. Baño maría de muestra a 25°C.



Fuente: Autores

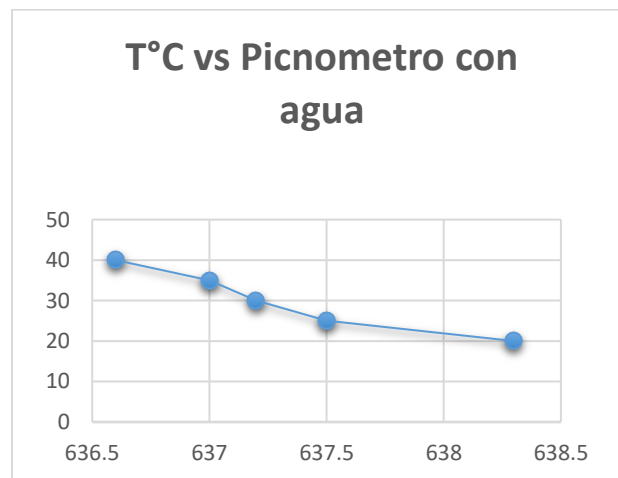
Posteriormente, luego de verificar que la muestra ya no cuente con aire atrapado, se sacó la muestra del baño maría. Se agito bien y se tomó lectura final de la temperatura con el peso final del picnómetro más agua más muestra.

$$T_{ensayo} = 23.3 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$M_{pws,t} = 675.61 \text{ g}$$

Con el dato de temperatura de ensayo, se identificó en la gráfica de calibración, el peso total del picnómetro más agua.

Grafica 3. Calibración de picnómetro



Fuente: Autores

$$M_{pw,t} = 637.93 \text{ g}$$

Conociendo los parámetros ya calculados, se procede a calcular la gravedad específica del suelo.

Para esto se utilizará la siguiente ecuación

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{M_s}{[M_{pw,t} - (M_{pws,t} - M_s)]} \quad (20)$$

Donde ρ_s es la densidad de las partículas sólidas en g/cm^3 ; $\rho_{w,t}$ es la densidad del agua a la temperatura del ensayo en g/cm^3 ; M_s es la masa de los sólidos del suelo secado en el horno en gramos; $M_{pws,t}$ es la masa del picnómetro con

agua y sólidos a la temperatura de ensayo en gramos y $M_{pw,t}$ es la masa del picnómetro lleno de agua a la temperatura de ensayo en gramos.

Haciendo uso de la ecuación (20) se obtiene:

$$G_t = \frac{\rho_s}{\rho_w} = \frac{69 \text{ g}}{[637.93 \text{ g} - (675.61 \text{ g} - 69 \text{ g})]} = 2.203$$

Ya obtenido la gravedad específica de la muestra. Finalmente, se le realiza un ajuste con un factor de temperatura (K) el cual lleva esta gravedad específica a una temperatura de 20°C. Para determinar este parámetro. Se hizo uso de la tabla de densidad de agua y coeficiente de corrección por temperatura encontrada en la norma invias 128 del 2013.

Según la tabla el coeficiente de corrección de temperatura fue de 0.99926

Finalmente se calcula la gravedad específica de las partículas sólidas del suelo a 20°C con la siguiente ecuación

$$G_{20^\circ c} = K * G_t \tag{21}$$

Haciendo uso de la ecuación (21) se obtiene

$$G_{20^\circ c} = 0.99926 * 2.203 = 2.201$$

Esta densidad relativa es la que se usara en los ensayos de sedimentación tipo 1 y tipo 2 realizados posteriormente.

Tabla 9. Densidad de agua y coeficiente de corrección por temperatura

Temperatura (° C)	Densidad (g/ cm ³)	Coficiente (K)	Temperatura (° C)	Densidad (g/ cm ³)	Coficiente (K)	Temperatura (° C)	Densidad (g/ cm ³)	Coficiente (K)	Temperatura (° C)	Densidad (g/ cm ³)	Coficiente (K)
15.0	0.99910	1.00090	16.0	0.99895	1.00074	17.0	0.99878	1.00057	18.0	0.99860	1.00039
.1	0.99909	1.00088	.1	0.99893	1.00072	.1	0.99876	1.00055	.1	0.99858	1.00037
.2	0.99907	1.00087	.2	0.99891	1.00071	.2	0.99874	1.00054	.2	0.99856	1.00035
.3	0.99906	1.00085	.3	0.99890	1.00069	.3	0.99872	1.00052	.3	0.99854	1.00034
.4	0.99904	1.00084	.4	0.99888	1.00067	.4	0.99871	1.00050	.4	0.99852	1.00032
.5	0.99902	1.00082	.5	0.99886	1.00066	.5	0.99869	1.00048	.5	0.99850	1.00030
.6	0.99901	1.00080	.6	0.99885	1.00064	.6	0.99867	1.00047	.6	0.99848	1.00028
.7	0.99899	1.00079	.7	0.99883	1.00062	.7	0.99865	1.00045	.7	0.99847	1.00026
.8	0.99898	1.00077	.8	0.99881	1.00061	.8	0.99863	1.00043	.8	0.99845	1.00024
.9	0.99896	1.00076	.9	0.99879	1.00059	.9	0.99862	1.00041	.9	0.99843	1.00022
19.0	0.99841	1.00020	20.0	0.99821	1.00000	21.0	0.99799	0.99979	22.0	0.99777	0.99957
.1	0.99839	1.00018	.1	0.99819	0.99998	.1	0.99797	0.99977	.1	0.99775	0.99954
.2	0.99837	1.00016	.2	0.99816	0.99996	.2	0.99795	0.99974	.2	0.99773	0.99952
.3	0.99835	1.00014	.3	0.99814	0.99994	.3	0.99793	0.99972	.3	0.99771	0.99950
.4	0.99833	1.00012	.4	0.99812	0.99992	.4	0.99791	0.99970	.4	0.99768	0.99947
.5	0.99831	1.00010	.5	0.99810	0.99990	.5	0.99789	0.99968	.5	0.99766	0.99944
.6	0.99829	1.00008	.6	0.99808	0.99987	.6	0.99786	0.99966	.6	0.99764	0.99943
.7	0.99827	1.00006	.7	0.99806	0.99985	.7	0.99784	0.99963	.7	0.99761	0.99940
.8	0.99825	1.00004	.8	0.99804	0.99983	.8	0.99782	0.99961	.8	0.99759	0.99938
.9	0.99823	1.00002	.9	0.99802	0.99981	.9	0.99780	0.99959	.9	0.99756	0.99936
23.0	0.99754	0.99933	24.0	0.99730	0.99909	25.0	0.99705	0.99884	26.0	0.99679	0.99858
.1	0.99752	0.99931	.1	0.99727	0.99907	.1	0.99702	0.99881	.1	0.99676	0.99855
.2	0.99749	0.99929	.2	0.99725	0.99904	.2	0.99700	0.99879	.2	0.99673	0.99852
.3	0.99747	0.99926	.3	0.99723	0.99902	.3	0.99697	0.99876	.3	0.99671	0.99850
.4	0.99745	0.99924	.4	0.99720	0.99899	.4	0.99694	0.99874	.4	0.99668	0.99847
.5	0.99742	0.99921	.5	0.99717	0.99897	.5	0.99692	0.99871	.5	0.99665	0.99844
.6	0.99740	0.99919	.6	0.99715	0.99894	.6	0.99689	0.99868	.6	0.99663	0.99842
.7	0.99737	0.99917	.7	0.99712	0.99892	.7	0.99687	0.99866	.7	0.99660	0.99839
.8	0.99735	0.99914	.8	0.99710	0.99889	.8	0.99684	0.99863	.8	0.99657	0.99836
.9	0.99732	0.99912	.9	0.99707	0.99887	.9	0.99681	0.99860	.9	0.99654	0.99833
27.0	0.99652	0.99831	28.0	0.99624	0.99803	29.0	0.99595	0.99774	30.0	0.99565	0.99744
.1	0.99649	0.99828	.1	0.99621	0.99800	.1	0.99592	0.99771	.1	0.99562	0.99741
.2	0.99646	0.99825	.2	0.99618	0.99797	.2	0.99589	0.99768	.2	0.99559	0.99738
.3	0.99643	0.99822	.3	0.99615	0.99794	.3	0.99586	0.99765	.3	0.99556	0.99735
.4	0.99641	0.99820	.4	0.99612	0.99791	.4	0.99583	0.99762	.4	0.99553	0.99732
.5	0.99638	0.99817	.5	0.99609	0.99788	.5	0.99580	0.99759	.5	0.99550	0.99729
.6	0.99635	0.99814	.6	0.99607	0.99785	.6	0.99577	0.99756	.6	0.99547	0.99726
.7	0.99632	0.99811	.7	0.99604	0.99783	.7	0.99574	0.99753	.7	0.99544	0.99723
.8	0.99629	0.99808	.8	0.99601	0.99780	.8	0.99571	0.99750	.8	0.99541	0.99720
.9	0.99627	0.99806	.9	0.99598	0.99777	.9	0.99568	0.99747	.9	0.99538	0.99716

Fuente: (INVIAS, 2013)

8.2. EVALUACION DE SEDIMENTACION

8.2.1. Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se llevo a cabo las instalaciones del laboratorio de plantas de tratamiento de agua potable y residual de la universidad Catolica de Colombia y se desarrollo de la siguiente manera.

- ✓ Se verifica la limpieza de la columna de sedimentacion. El Fondo debe de estar totalmente libre de particulas.
- ✓ Se alistan los recipiente que contendran las diferentes muestras a evaluar.(Figura 39.)

- ✓ Se pone a llenar la estructura hasta 1 metro de altura, Mientras se va llenando la estructura(figura 40), Se calibra la presión del compresor de aire con un manómetro. Esta presión no debe de exceder 20 psi.
- ✓ Se abre la válvula que permite el paso del aire. Se deja llenar la estructura hasta el nivel indicado. Dicho nivel está a 25 cm por encima del último punto de muestreo. (41)
- ✓ se prepara la muestra de arena diluyéndolo en un frasco de precipitado con 300 ml de agua y se agita hasta obtener una muestra homogénea.
- ✓ Mientras se mantiene el agua agitada con aire, se va diluyendo la muestra dentro de la columna de sedimentación.(Figura 42.). Se mantiene agitada la muestra hasta que se tome la lectura de la temperatura del ensayo.(Figura 43.)
- ✓ En cuanto se apague el sistema de aire. Se empieza a tomar el tiempo de ensayo para el cual fue diseñado. Como también se toma el registro de turbiedad Inicial.
- ✓ Se toman muestras en los diferentes puntos con el tiempo de diseño(Figura tal).Para este paso es necesario purgar los puntos de muestreo. Puesto que los sedimentos tienden a acumularse en las válvulas.
- ✓ Se evalúan las muestras en un turbidímetro. (figura tal)
- ✓ Se ingresan los datos a una tabla que compara la altura de toma de muestras vs el tiempo y se procede a su análisis.

Figura 40. Recipientes para muestras.



Fuente: Autores

Figura 41. Llenado de la estructura a 1m.



Fuente: Autores.

Figura 42. Llenado total del prototipo.



Fuente: Autores

Figura 43. Diluyendo Muestra en el prototipo



Fuente: Autores

Figura 44. Toma de registro de temperatura



Fuente: Autores

Figura 45. Muestreo para Evaluar



Fuente: Autores

Figura 46. Lectura del turbidimetro.



Fuente: Autores

Por ultimo En las figuras 46, 47 y 48 se evidencia el cambio de color en la muestra en diferentes tiempos. Como tambien se evidencia los lodos que quedan despues del ensayo.

Figura 47. Columna de sedimentación sin muestra



Fuente: Autores

Figura 48. Columna de sedimentación 5 min. De ensayo



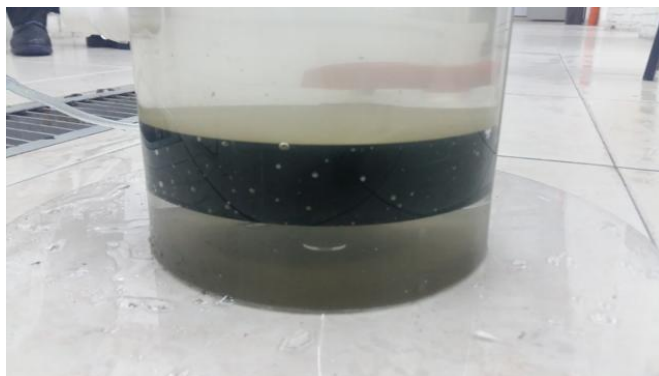
Fuente: Autores

Figura 49. Columna de sedimentación después del ensayo



Fuente: Autores

Figura 50. Fondo con lodos



Fuente: Autores

8.3. SEDIMENTACION TIPO I

En este tipo de sedimentación se evaluaron las partículas retenidas en los tamices #100, #200 y pasa 200. Se tomaron 3 puntos de la columna para evaluar la remoción (50 cm, 100 cm y 150 cm); así mismo se realizaron 2 pruebas por cada tamiz con concentraciones de turbiedad distintas.

8.3.1. Prueba no. 1 para tamiz #100

En primera instancia, se evalúa la velocidad de sedimentación con la ecuación de Stokes, para determinar el régimen de flujo que maneja la partícula. Para ello es requerido algunos parámetros que fueron hallados experimentalmente y se muestra en la tabla 11.

Tabla 10. Parámetros iniciales para prueba 1, para tamiz #100

Tamiz	No	100
Diametro Particula	d (mm)	0,15
Densidad de la particula	ρ_1 (g/cm ³)	2,2
Densidad del Agua	ρ (g/cm ³)	1
Temperatura	°C	18,6
Viscocidad cinematica del fluido	vc (m ² /s)	1,08E-06
Aceleracion de l gravedad	m/s ²	9,81

Fuente: Autores

Tabla 11. Resumen de iteraciones para velocidad de sedimentación Prueba No. 1, Tamiz #100

Iteración 1:	CD= 16,45 Vs(m/s)= 0,01196 NR= 1,66	Iteración 2:	CD= 17,08 Vs(m/s)= 0,01174 NR= 1,633
Iteración 3:	CD= 17,38 Vs(m/s)= 0,0116 NR= 1,6195	Iteración 4:	CD= 17,52 Vs(m/s)= 0,0116 NR= 1,6132

Fuente: Autores.

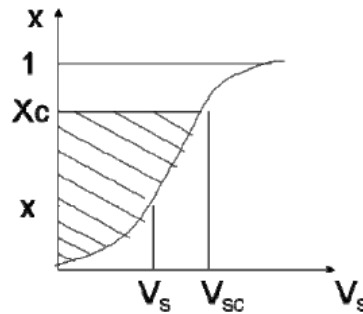
- ✓ El valor resaltado es el valor usado para la evaluación de remoción.

Obtenido ya el parámetro de carga superficial de la muestra, se procede a evaluar la remoción de la primera muestra del tamiz #100 en diferentes alturas (50 cm, 100 cm y 150 cm), por medio de la teoría de Hazem para un sedimentador ideal de partículas discretas.

Si de todas las partículas que entran en el tanque hay una fracción X_c , que tienen velocidades menores a la velocidad crítica (V_{sc}), la fracción que será removida totalmente es $(1-X_c)$. En sedimentadores Horizontales $(1-X_c)$ es el porcentaje de las partículas que se sedimentan en su totalidad. Del remanente $\int_0^{p_0} \left(\frac{V_s}{V_{sc}}\right) dp$ hay una cierta aprte que se alcanza a decantar, a lo que la remoción total se convierte en:

$$R_{t=} (1 - X_c) + \frac{1}{V_{sc}} * \int_0^{X_c} V_s dc \quad (22)$$

Figura 51. Curva Integral para el análisis de fracción total de partículas removidas



Fuente: (Santamaria Alzate, 2016)

Para calcular estos parámetros se realizó una tabla con los datos obtenidos para las diferentes alturas.

- ✓ Altura de 50 cm

Tabla 12. Datos experimentales prueba No. 1 con tamiz #100, a una altura de 50 cm

UNTO	58.3
CS(m/h)	41.74
h(cm)	50

t(min)	UNT	(1-Xc)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
0.5	36.9	0.367	0.6329	1.00	60
		0.386	0.6141	0.70	41.74
1	35.1	0.398	0.6021	0.50	30
1.5	34.7	0.405	0.5952	0.33	20
2	34	0.417	0.5832	0.25	15
2.5	32	0.451	0.5489	0.20	12

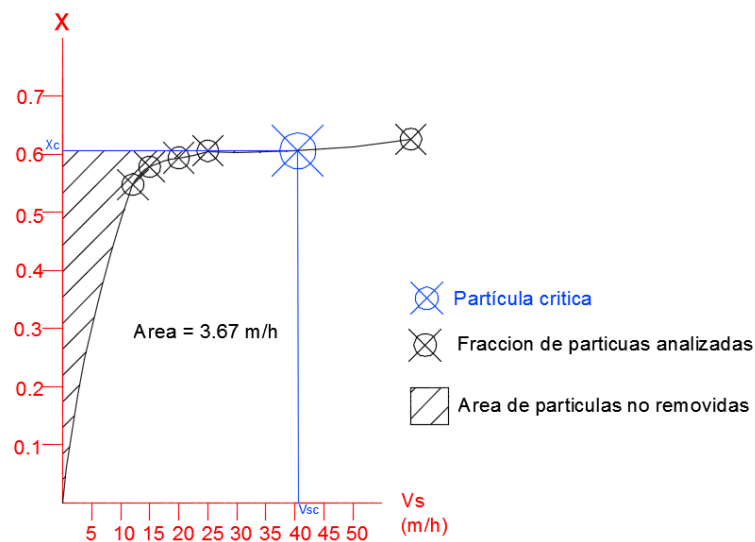
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.0116 \text{ m/s} \rightarrow 41.74 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 4. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 100 y h=50 cm



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_{t=} \left(0.386 + \frac{1}{41.74 \text{ m/h}} * 3.67 \text{ m/h} \right) * 100 = 47.39\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 50 cm.

Así mismo se realiza el procedimiento para las demás pruebas realizadas.

✓ Altura de 100 cm

Tabla 13. Datos experimentales prueba No. 1 con tamiz #100, a una altura de 100 cm

UNTO	58.3
CS(m/s)	41.74
h(cm)	100

t(min)	UNT	(1-Xc)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
1	39.8	0.3	0.683	1.00	60
		0.361	0.639	0.70	41.74
2	33.8	0.4	0.580	0.50	30
3	33.5	0.4	0.575	0.33	20
4	30.5	0.5	0.523	0.25	15
5	28.9	0.5	0.496	0.20	12

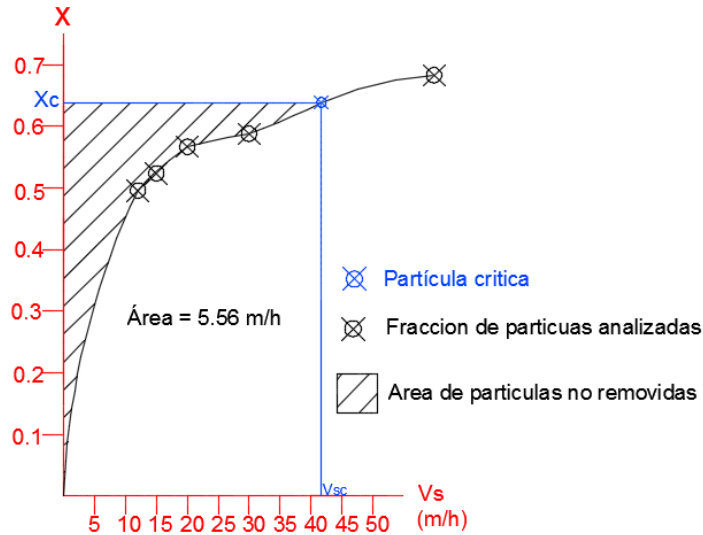
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente, esta velocidad se pasa a m/h

$$0.0116 \text{ m/s} \rightarrow 41.74 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 5. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 100 y h=100 cm



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_{t=} \left(0.361 + \frac{1}{41.74 \text{ m/h}} * 5.56 \text{ m/h} \right) * 100 = 49.42\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 100 cm.

✓ Altura de 150 cm

Tabla 14. Datos experimentales prueba No. 1 con tamiz #100, a una altura de 150 cm.

UNTO	58.3
CS(m/s)	41.74
h(cm)	150

t(min)	UNT	(1-Xc)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
2	32.7	0.4	0.561	0.75	45
		0.441	0.559	0.70	41.74
4	31.9	0.5	0.547	0.38	22.5
6	31.1	0.5	0.533	0.25	15
8	30.8	0.5	0.528	0.19	11.25
10	27.7	0.5	0.475	0.15	9

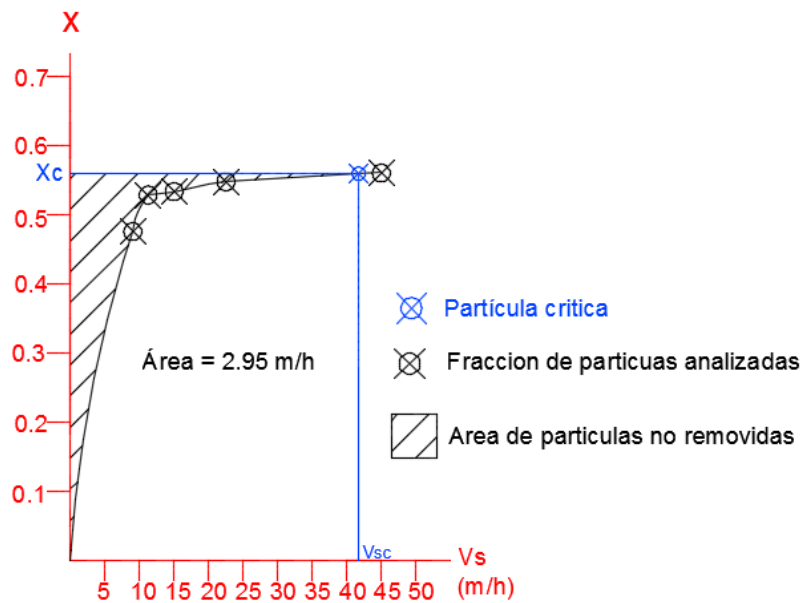
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.0116 \text{ m/s} \rightarrow 41.74 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que V_{sc} . (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 6. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 100 y h=150 cm



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_{t=} \left(0.441 + \frac{1}{41.74 \text{ m/h}} * 2.95 \text{ m/h} \right) * 100 = 51.17\% \text{ de remocion}$$

- ✓ El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 150 cm.

8.3.2. Prueba no. 2 para tamiz #100

Se realizó el mismo procedimiento de la Prueba No. 1, pero con diferente turbiedad y temperatura. Solo se colocaron los parámetros más importantes para la evaluación de la remoción.

Tabla 15. Parámetros iniciales para prueba No 2, tamiz #100

Tamiz	No	100
Diámetro Particula	d (mm)	0,15
Densidad de la particula	ρ_1 (g/cm ³)	2,2
Densidad del Agua	ρ (g/cm ³)	1
Temperatura	°C	14,3
Viscosidad cinematica del fluido	vc (m ² /s)	1,16E-06
Aceleracion de l gravedad	m/s ²	9,81

Fuente: Autores

- ✓ Calculo de la velocidad de sedimentación con la ecuación (5).

$$V_s = \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{18} \left(\frac{2.2 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{1.16 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \right) (0.00015 \text{ m})^2 = 12.664 \text{ mm/s}$$

- ✓ Se verifica, la zona en función del No. Reynolds con la ecuación (6)

$$Re = \frac{13.650 \text{ mm/s} * 0.15 \text{ mm}}{0.108 \text{ mm}^2/\text{s}} = 1.63$$

- ✓ Corrección de la velocidad por medio del coeficiente de arrastre con la tabla 2.

$$CD = \frac{24}{1.63} + \frac{3}{\sqrt{1.63}} = 17.37$$

- ✓ Cálculo de la velocidad de sedimentación corregida por la ecuación (7) de Newton.

$$V_s = \sqrt{\frac{4 * 9.81 \frac{m}{s^2}}{3} \times \frac{2.2 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}}{17.37}} \times 0.15 \text{ mm} = 11.64 \frac{mm}{s}$$

$$= 0.01164 \frac{m}{s}$$

Tabla 16. Resumen de iteraciones para velocidad de sedimentación. Prueba No. 2, tamiz #100

Iteración 1	CD= 18,76 Vs= 0,01120 NR= 1,45	Iteración 2	CD= 19,43 Vs= 0,01101 NR= 1,421
Iteración 3	CD= 19,75 Vs= 0,0109 NR= 1,4096	Iteración 4	CD= 19,89 Vs= 0,0109 NR= 1,4043

Fuente: Autores.

- ✓ El valor resaltado es el valor usado para la evaluación de remoción.

Luego de realizar los procedimientos teóricos empezamos a analizar las remociones en cada una de las alturas estudiadas.

- ✓ Altura de 50 cm.

Tabla 17. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #100, a una altura de 50 cm.

UNTO	39.3
CS(m/h)	39.16
H (cm)	50

t(min)	UNT	(1-Xc)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
0.5	22.5	0.427	0.573	1.00	60
		0.451	0.549	0.65	39.16
1	21.1	0.463	0.537	0.50	30
1.5	20.4	0.481	0.519	0.33	20
2	18.3	0.534	0.466	0.25	15
2.5	16.4	0.583	0.417	0.20	12

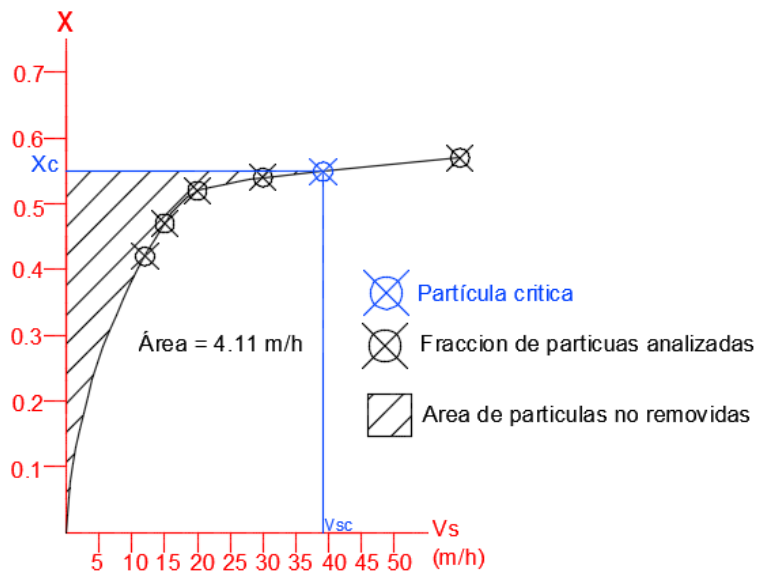
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.0109 \text{ m/s} \rightarrow 39.16 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que V_{sc} . (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 7. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 100 y $h=50$ cm



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_{t=} \left(0.451 + \frac{1}{39.16 \text{ m/h}} * 4.11 \text{ m/h} \right) * 100 = 55.56 \% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 50 cm.

Así mismo se realiza el procedimiento para las demás pruebas realizadas.

✓ Altura de 100 cm

Tabla 18. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #100, a una altura de 100 cm.

UNTO	39.3
CS(m/h)	39.16
H(cm)	100

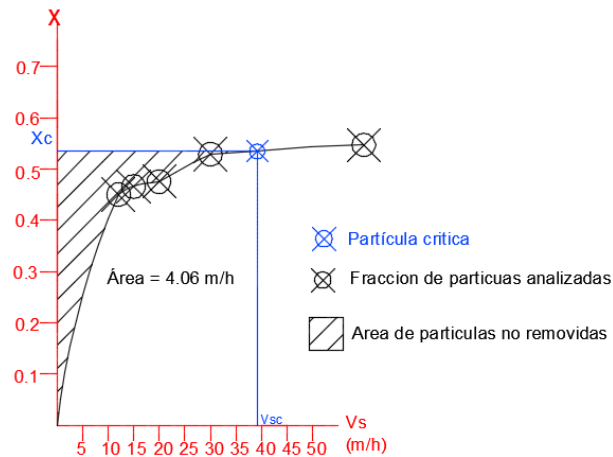
t(min)	UNT	(1-Xc)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
1	21.5	0.453	0.547	1.00	60
		0.466	0.5345	0.65	39.16
2	20.8	0.471	0.529	0.50	30
3	18.7	0.524	0.476	0.33	20
4	18.3	0.534	0.466	0.25	15
5	17.7	0.550	0.450	0.20	12

Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h
 $0.0109 \text{ m/s} \rightarrow 39.16 \text{ m/h}$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 8. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 100 y h=100 cm



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_{t=} \left(0.466 + \frac{1}{39.16 \frac{m}{h}} * 4.06 \frac{m}{h} \right) * 100 = 56.98\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 100 cm.

- ✓ Altura de 150 cm

Tabla 19. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #100, a una altura de 150 cm.

UNTO	39.3
CS(m/h)	39.16
h(cm)	150

t(min)	UNT	(1-Xc)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
2	22.5	0.427	0.573	0.75	45
		0.436	0.56417	0.65	39.16
4	21.2	0.461	0.539	0.38	22.5
6	20.5	0.478	0.522	0.25	15
8	19.5	0.504	0.496	0.19	11.25
10	18.7	0.524	0.476	0.15	9

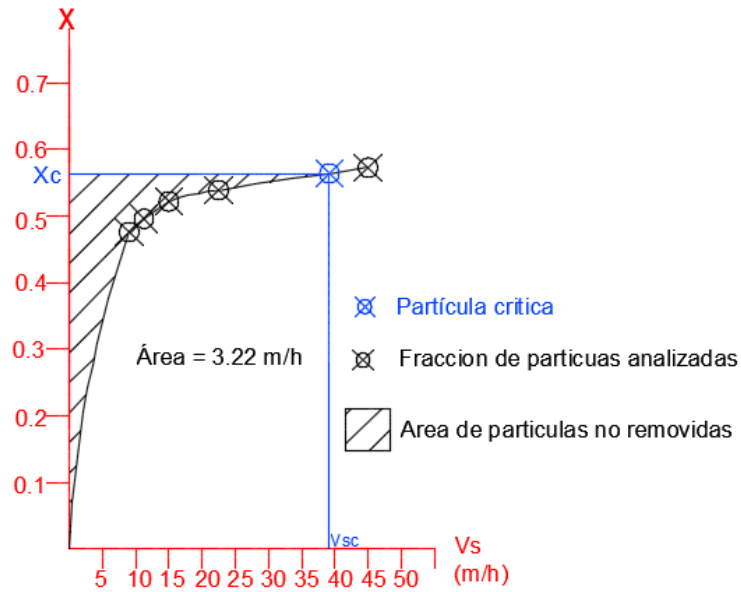
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.0109 \frac{m}{s} \rightarrow 39.16 \frac{m}{h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 9. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 100 y h=150 cm.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_t = \left(0.436 + \frac{1}{39.16 \text{ m/h}} * 3.22 \text{ m/h} \right) * 100 = 51.82\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 150 cm.

8.3.3. Prueba no. 1 para tamiz #200.

Se realizó el mismo procedimiento que para el tamiz #100, Solo se colocaron los parámetros más importantes para la evaluación de la remoción.

Tabla 20. Parámetros iniciales para prueba No 1, tamiz #200

Tamiz	No	100
Diametro Particula	d (mm)	0,075
Densidad de la particula	ρ_1 (g/cm3)	2,2
Densidad del Agua	ρ (g/cm3)	1
Temperatura	°C	15
Viscocidad cinematica del fluido	vc (m2/s)	1,14E-06
Aceleracion de l gravedad	m/s2	9,81

Fuente: Autores

- ✓ Calculo de la velocidad de sedimentación con la ecuación (5)

$$V_s = \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{18} \left(\frac{2.2 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{1.14 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \right) (0.000075 \text{ m})^2 = 3.11 \text{ mm/s}$$

- ✓ Se verifica, la zona en función del No. Reynolds con la ecuación (6)

$$Re = \frac{3.11 \text{ mm/s} * 0.075 \text{ mm}}{0.114 \text{ mm}^2/\text{s}} = 0.20$$

En este caso se usa el coeficiente de arrastre de Newton donde prevalece el flujo laminar.

$$Cd = \frac{24}{R} \quad (23)$$

Haciendo uso de la ecuación (23)

$$Cd = \frac{24}{0.20} = 117.251$$

- ✓ Calculo de la velocidad de sedimentación corregida por la ecuación de Newton

$$V_s = \sqrt{\frac{4 * 9.81 \text{ m/s}^2}{3} \times \frac{2.2 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{117.251} \times 0.075 \text{ mm}} = 3.11 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$= 0.00311 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Las velocidades por medio de la fórmula de Stokes y la corregida por Newton Son iguales por lo que no es necesario iterar para encontrar el valor de velocidad.

Luego de realizar los procedimientos teóricos empezamos a analizar las remociones en cada una de las alturas estudiadas.

- ✓ Altura de 50 cm

Tabla 21. Datos experimentales prueba No. 1 con tamiz #200, a una altura de 50 cm.

UNTO	30.5
CS(m/h)	11.21
h(cm)	50

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
1	29.2	0.043	0.9574	0.5000	30
2	20	0.344	0.6557	0.2500	15
		0.364	0.6358	0.1868	11.21
3	19.2	0.370	0.6295	0.1667	10
4	17.5	0.426	0.5738	0.1250	7.5
5	16.1	0.472	0.5279	0.1000	6

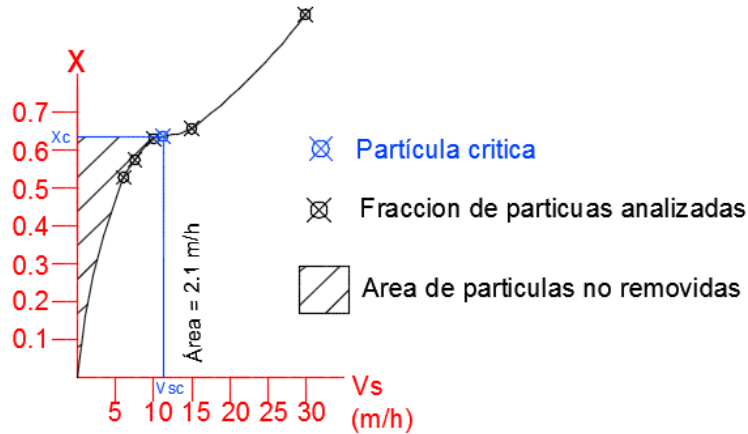
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.00311 \text{ m/s} \rightarrow 11.21 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 10. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 200 y h=50 cm



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_t = \left(0.364 + \frac{1}{11.21 \text{ m/h}} * 2.1 \text{ m/h} \right) * 100 = 55.13\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 50 cm.

Así mismo se realiza el procedimiento para las demás pruebas realizadas.

✓ Altura de 100 cm.

Tabla 22. Datos experimentales prueba No.1 con tamiz #200, a una altura de 100 cm.

UNTO	30.5
CS(m/h)	11.21
h(cm)	100

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
5	18.7	0.387	0.6131	0.2000	12
		0.389	0.6114	0.1868	11.21
10	18.3	0.400	0.6000	0.1000	6
15	13.9	0.544	0.4557	0.0667	4
20	13.3	0.564	0.4361	0.0500	3
25	10.1	0.669	0.3311	0.0400	2.4

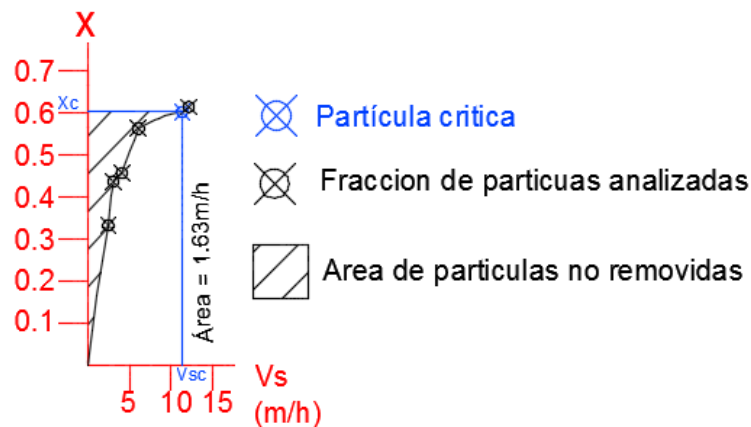
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h.

$$0.00311 \text{ m/s} \rightarrow 11.21 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que V_{sc} . (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 11. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 200 y $h=100$ cm



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_t = \left(0.389 + \frac{1}{11.21 \text{ m/h}} * 1.63 \text{ m/h} \right) * 100 = 53.44 \% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 100 cm.

- ✓ Altura de 150 cm.

Tabla 23. Datos experimentales prueba No.1 con tamiz #200, a una altura de 150 cm.

UNTO	30.5
CS(m/h)	11.21
h(cm)	150

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
5	30.1	0.013	0.987	0.3000	18
		0.125	0.875	0.18684	11.21
10	25.6	0.161	0.839	0.1500	9
15	20.5	0.328	0.672	0.1000	6
20	15.1	0.505	0.495	0.0750	4.5
25	13.2	0.567	0.433	0.0600	3.6

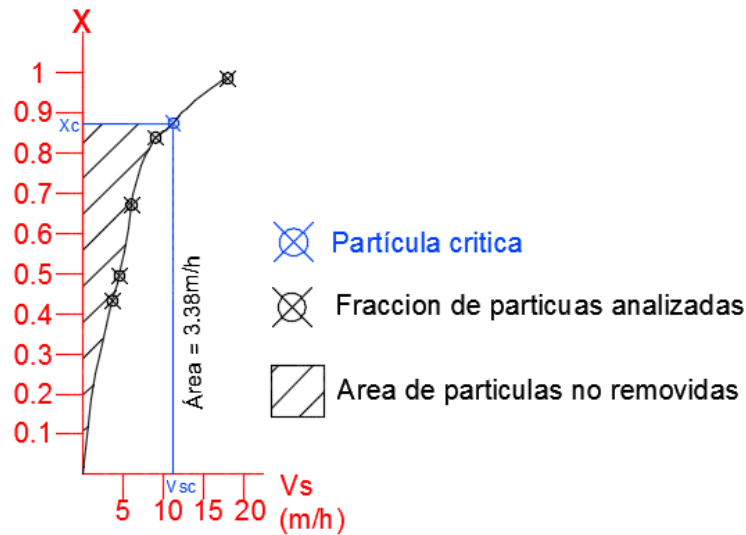
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.00311 \text{ m/s} \rightarrow \frac{11.21m}{h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 12. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, tamiz # 200 y h=150 cm.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22).

$$R_t = \left(0.125 + \frac{1}{11.21 \text{ m/h}} * 3.38 \text{ m/h} \right) * 100 = 42.65\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 150 cm

8.3.4. Prueba no. 2 para tamiz #200.

Se realizó el mismo procedimiento de la Prueba No. 1, pero con diferente turbiedad y temperatura. Solo se colocaron los parámetros más importantes para la evaluación de la remoción.

Tabla 24. Parámetros iniciales para prueba No. 2, tamiz #200

Tamiz	No	100
Diametro Particula	d (mm)	0,075
Densidad de la particula	ρ_1 (g/cm ³)	2,2
Densidad del Agua	ρ (g/cm ³)	1
Temperatura	°C	15,6
Viscosidad cinematica del fluido	vc (m ² /s)	1,14E-06
Aceleracion de l gravedad	m/s ²	9,81

Fuente: Autores

- ✓ Calculo de la velocidad de sedimentación con la ecuación (5)

$$V_s = \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{18} \left(\frac{2.2 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{1.14 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \right) (0.00075 \text{ m})^2 = 3.097 \text{ mm/s}$$

- ✓ Se verifica, la zona en función del No Reynolds con la ecuación (6)

$$Re = \frac{13.650 \text{ mm/s} * 0.15 \text{ mm}}{0.108 \text{ mm}^2/\text{s}} = 1.63$$

- ✓ Corrección de la velocidad por medio del coeficiente de arrastre con la ecuación (23)

$$Cd = \frac{24}{0.20} = 117.251$$

- ✓ Calculo de la velocidad de sedimentación corregida por la ecuación de Newton. Con la ecuación (7)

$$V_s = \sqrt{\frac{4 * 9.81 \text{ m/s}^2}{3} \times \frac{2.2 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{117.251} \times 0.075 \text{ mm}} = 3.11 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$= 0.003097 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Luego de realizar los procedimientos teóricos empezamos a analizar las remociones en cada una de las alturas estudiadas.

- ✓ Altura de 50 cm.

Tabla 25. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #200, a una altura de 50 cm.

UNTO	38.8
CS	11.15
h(cm)	50

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
1	25.8	0.335	0.665	0.5000	30
2	22.5	0.420	0.580	0.2500	15
		0.526	0.475	0.1858	11.15
3	17.2	0.557	0.443	0.1667	10
4	16.8	0.567	0.433	0.1250	7.5
5	16.1	0.585	0.415	0.1000	6

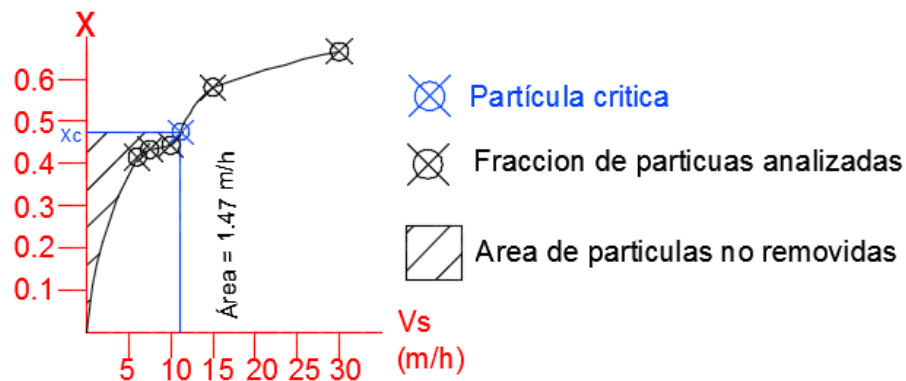
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.00397 \text{ m/s} \rightarrow 11.15 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 13. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 200 y h=50 cm.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_t = \left(0.526 + \frac{1}{11.15 \text{ m/h}} * 1.47 \text{ m/h} \right) * 100 = 65.78 \% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 50 cm.

Se realiza el procedimiento para las demás pruebas realizadas.

- ✓ Altura de 100 cm

Tabla 26. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #200, a una altura 100 cm

UNTO	38.8
CS	11.15
h(cm)	100

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
5	26.6	0.314	0.686	0.2000	12
		0.330	0.670	0.1858	11.15
10	22.3	0.425	0.575	0.1000	6
15	17.8	0.541	0.459	0.0667	4
20	13.2	0.660	0.340	0.0500	3
25	10.4	0.732	0.268	0.0400	2.4

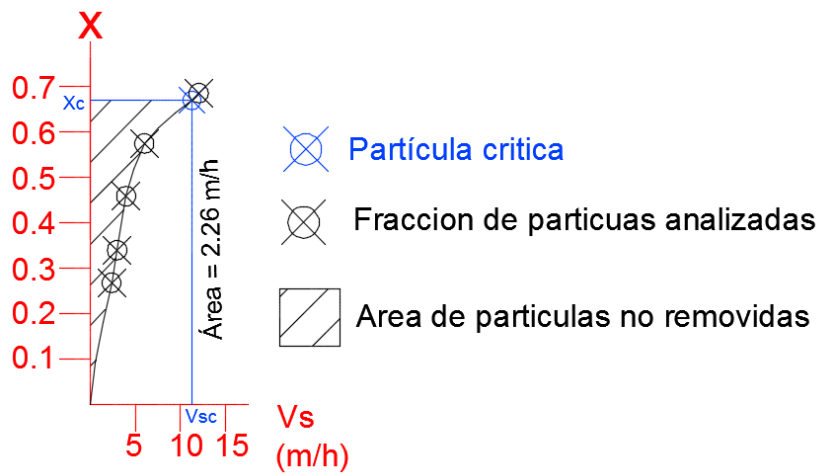
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.00397 \text{ m/s} \rightarrow 11.15 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 14. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 200 y h=100 cm.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_{t=} \left(0.330 + \frac{1}{11.15 \text{ m/h}} * 2.26 \text{ m/h} \right) * 100 = 53.27\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 100 cm.

✓ Altura de 150 cm

Tabla 27. Datos experimentales prueba No.2 con tamiz #200, a una altura de 150 cm.

UNTO	38.8
CS	11.15
h(cm)	150

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
5	29.4	0.242	0.758	0.3000	18
		0.445	0.556	0.18580	11.15
10	19.1	0.508	0.492	0.1500	9
15	13.3	0.657	0.343	0.1000	6
20	12.9	0.668	0.332	0.0750	4.5
25	11.8	0.696	0.304	0.0600	3.6

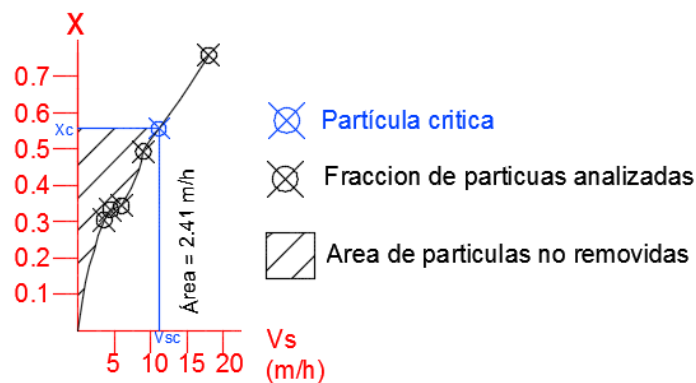
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.00397 \text{ m/s} \rightarrow 11.15 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 15. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, tamiz # 200 y h=150 cm.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_t = \left(0.445 + \frac{1}{11.15 \text{ m/h}} * 2.41 \text{ m/h} \right) * 100 = 66.11\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al (%) de remoción de las partículas a una altura de 150 cm.

8.3.5. PRUEBA NO. 1 PARA PASA TAMIZ #200.

Se realizó el mismo procedimiento que para el tamiz #100 y #200, Solo se colocaron los parámetros más importantes para la evaluación de la remoción.

Tabla 28. Parámetros iniciales para prueba No. 1, pasa tamiz #200

Tamiz	No	<200
Diametro Particula	d (mm)	0,062
Densidad de la particula	ρ_1 (g/cm ³)	2
Densidad del Agua	ρ (g/cm ³)	1
Temperatura	°C	17.8
Viscocidad cinematica del fluido	ν (m ² /s)	1,04E-06
Aceleracion de l gravedad	m/s ²	9,81

Fuente: Autores

- ✓ Calculo de la velocidad de sedimentación con la ecuación (5)

$$V_s = \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{18} \left(\frac{2.2 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{1.04 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \right) (0.000062 \text{ m})^2 = 2.023 \text{ mm/s}$$

- ✓ Se verifica, la zona en función del No. Reynolds con la ecuación (6)

$$Re = \frac{2.023 \text{ mm/s} * 0.075 \text{ mm}}{0.104 \text{ mm}^2/\text{s}} = 0.12$$

En este caso se usa el coeficiente de arrastre de Newton donde prevalece el flujo laminar.

Haciendo uso de la ecuación tal (23)

$$Cd = \frac{24}{0.12} = 198.17$$

- ✓ Calculo de la velocidad de sedimentación corregida por la ecuación (7) de Newton

$$V_s = \sqrt{\frac{4 * 9.81 \text{ m/s}^2}{3} \times \frac{2.2 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{198.17} \times 0.062 \text{ mm}} = 2.023 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$= 0.002023 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Las velocidades por medio de la fórmula de Stokes y la corregida por Newton son iguales, por lo que no es necesario iterar para encontrar el valor de velocidad.

Luego de realizar los procedimientos teóricos empezamos a analizar las remociones en cada una de las alturas estudiadas.

✓ Altura de 50 cm

Tabla 29. Datos experimentales prueba No.1 con pasa tamiz #200, a una altura de 50cm.

UNTO	34.2
CS	7.28
h(cm)	50

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
2	30.5	0.108	0.892	0.25	15
4	29.8	0.129	0.871	0.13	7.5
		0.140	0.86	0.12	7.28
6	25.6	0.251	0.749	0.08	5
8	23.4	0.316	0.684	0.06	3.75
10	22.7	0.336	0.664	0.05	3

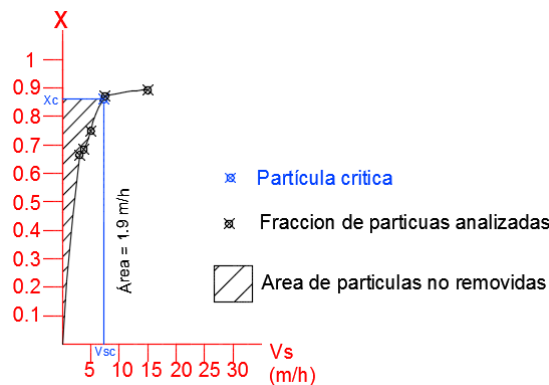
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.002023 \text{ m/s} \rightarrow 7.28 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 16. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, pasa tamiz # 200 y h=50 cm.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_{t=50} = \left(0.140 + \frac{1}{7.28 \text{ m/h}} * 1.9 \text{ m/h} \right) * 100 = 40.1\% \text{ de remoción}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 50 cm.

Así mismo se realiza el procedimiento para las demás pruebas realizadas.

- ✓ Altura de 100 cm

Tabla 30. Datos experimentales prueba No.1 con pasa tamiz #200, a una altura de 100 cm.

UNTO	34.2
CS	7.28
h(cm)	100

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
5	31.4	0.082	0.918	0.20	12
		0.215	0.785	0.12	7.28
10	25.6	0.251	0.749	0.10	6
15	24.8	0.275	0.725	0.07	4
20	23.8	0.304	0.696	0.05	3
25	19.8	0.421	0.579	0.04	2.4

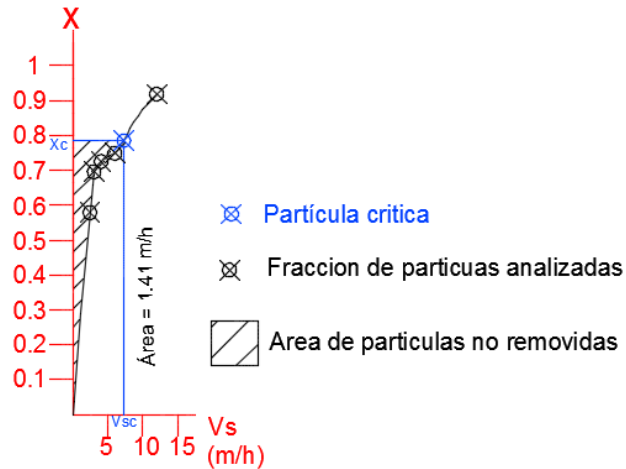
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h.

$$0.002023 \text{ m/s} \rightarrow 7.28 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 17. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, pasa tamiz # 200 y h=100 cm.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22), el porcentaje total de remoción.

$$R_t = \left(0.215 + \frac{1}{7.28 \text{ m/h}} * 1.41 \text{ m/h} \right) * 100 = 40.87 \% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 100 cm.

✓ Altura de 150 cm

Tabla 31. Datos experimentales prueba No.1 con pasa tamiz #200, a una altura de 150 cm

UNTO	34.2
CS	7.28
h(cm)	150

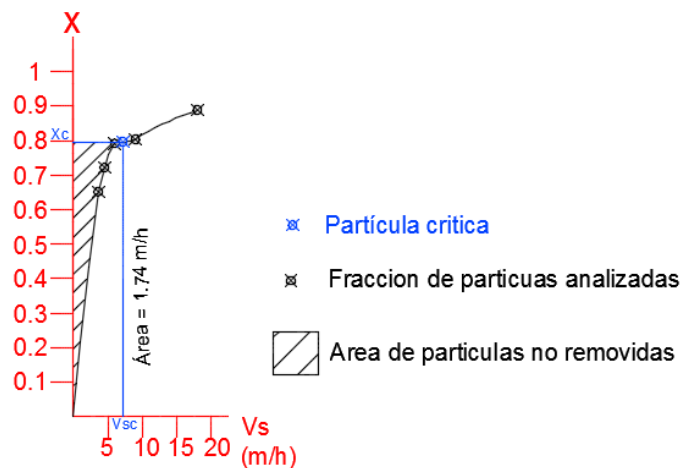
t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
5	30.4	0.111	0.889	0.30	18
10	27.5	0.196	0.804	0.15	9
		0.203	0.797	0.12	7.28
15	27.1	0.208	0.792	0.10	6
20	24.7	0.278	0.722	0.08	4.5
25	22.3	0.348	0.652	0.06	3.6

Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h
 $0.002023 \text{ m/s} \rightarrow 7.28 \text{ m/h}$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que V_{sc} . (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 18. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 1, pasa tamiz # 200 y $h=150 \text{ cm}$.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22)

$$R_t = \left(0.203 + \frac{1}{7.28 \text{ m/h}} * 1.74 \text{ m/h} \right) * 100 = 44.2\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 150 cm

3.5.6. PRUEBA NO. 2 PARA PASA TAMIZ #200

Se realizó el mismo procedimiento de la Prueba No. 1, pero con diferente turbiedad y temperatura. Solo se colocaron los parámetros más importantes para la evaluación de la remoción.

Tabla 32. Parámetros iniciales para prueba No. 2, pasa tamiz #200

Tamiz	No	<200
Diametro Particula	d (mm)	0,062
Densidad de la particula	ρ_1 (g/cm ³)	2
Densidad del Agua	ρ (g/cm ³)	1
Temperatura	°C	15,3
Viscosidad cinematica del fluido	ν (m ² /s)	1,13E-06
Aceleracion de l gravedad	m/s ²	9,81

Fuente: Autores

- ✓ Calculo de la velocidad de sedimentación con la ecuación (5)

$$V_s = \frac{9.81 \text{ m/s}^2}{18} \left(\frac{2.2 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{1.13 * 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}} \right) (0.00062 \text{ m})^2 = 1.85 \text{ mm/s}$$

- ✓ Se verifica, la zona en función del No Reynolds con la ecuación (6)

$$Re = \frac{1.85 \text{ mm/s} * 0.062 \text{ mm}}{0.113 \text{ mm}^2/\text{s}} = 0.10$$

- ✓ Corrección de la velocidad por medio del coeficiente de arrastre con la ecuación (23)

$$Cd = \frac{24}{0.10} = 240$$

- ✓ Calculo de la velocidad de sedimentación corregida por la ecuación (7) de Newton.

$$V_s = \sqrt{\frac{4 * 9.81 \text{ m/s}^2}{3} \times \frac{2.2 \text{ g/cm}^3 - 1 \text{ g/cm}^3}{240}} \times 0.062 \text{ mm} = 1.849 \frac{\text{mm}}{\text{s}}$$

$$= 0.00185 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Luego de realizar los procedimientos teóricos empezamos a analizar las remociones en cada una de las alturas estudiadas.

- ✓ Altura de 50 cm.

Tabla 33. Datos experimentales prueba No. 2 con pasa tamiz #200, a una altura de 50 cm.

UNTO	38.7
CS	6.68
h(cm)	50

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
2	30.4	0.214	0.786	0.25	15
4	28.5	0.264	0.736	0.13	7.5
		0.272	0.728	0.11	6.68
6	27.5	0.289	0.711	0.08	5
8	26.1	0.326	0.674	0.06	3.75
10	25.8	0.333	0.667	0.05	3

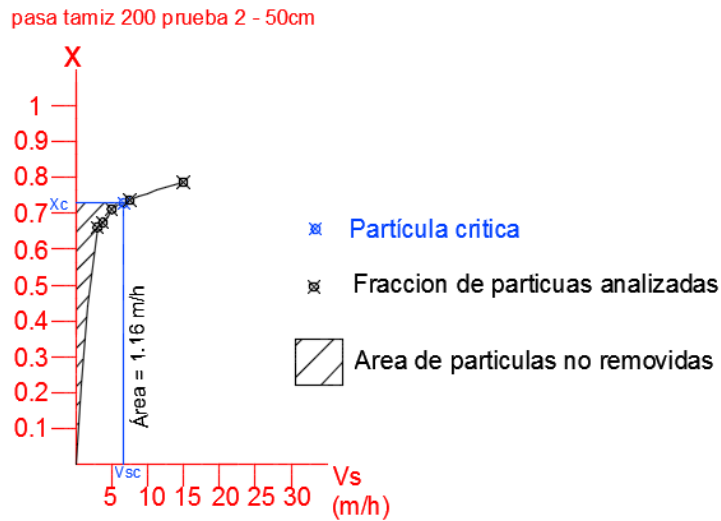
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.00185 \text{ m/s} \rightarrow 6.68 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 19. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, pasa tamiz # 200 y h=50 cm.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22).

$$R_{t=} \left(0.272 + \frac{1}{6.68 \text{ m/h}} * 1.16 \text{ m/h} \right) * 100 = 44.56 \% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 50 cm.

Se realiza el procedimiento para las demás pruebas realizadas.

- ✓ Altura de 100 cm

Tabla 34. Datos experimentales prueba No.2 con pasa tamiz #200, a una altura de 100 cm.

UNTO	38.7
CS	6.68
h(cm)	100

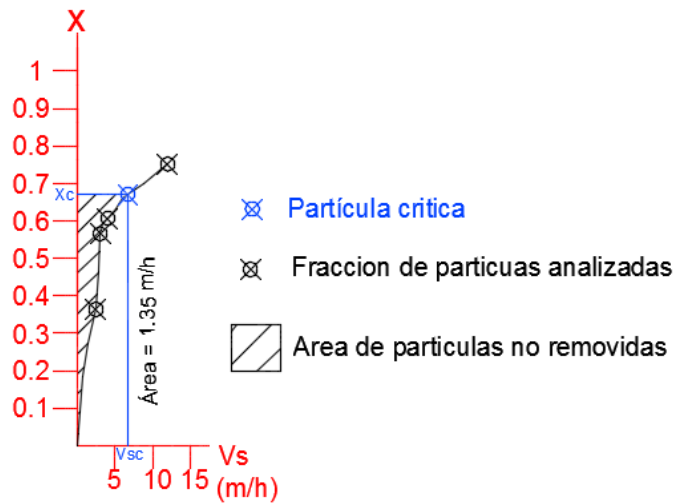
t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs (m/h)
5	29.1	0.248	0.752	0.2000	12
		0.329	0.671	0.1113	6.68
10	25.6	0.339	0.661	0.1000	6
15	23.5	0.393	0.607	0.0667	4
20	21.9	0.434	0.566	0.0500	3
25	14.1	0.636	0.364	0.0400	2.4

Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h
 $0.00185 \text{ m/s} \rightarrow 6.68 \text{ m/h}$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que V_{sc} . (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 20. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, pasa tamiz # 200 y $h=100 \text{ cm}$.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22)

$$R_t = \left(0.329 + \frac{1}{6.68 \text{ m/h}} * 1.35 \text{ m/h} \right) * 100 = 53.11\% \text{ de remocion}$$

El anterior valor corresponde al % de remoción de las partículas a una altura de 100 cm.

- ✓ Altura de 150 cm

Tabla 35. Datos experimentales prueba No.2 con pasa tamiz #200, a una altura de 150 cm

UNTO	38.7
CS	6.68
h(cm)	150

t(min)	UNT	(1-Xo)	X	Vs(m/min)	Vs(m/h)
5	23.4	0.395	0.605	0.30	18
10	20.4	0.473	0.527	0.15	9
		0.491	0.509	0.11	6.68
15	19.5	0.496	0.504	0.10	6
20	18.3	0.527	0.473	0.08	4.5
25	18	0.535	0.465	0.06	3.6

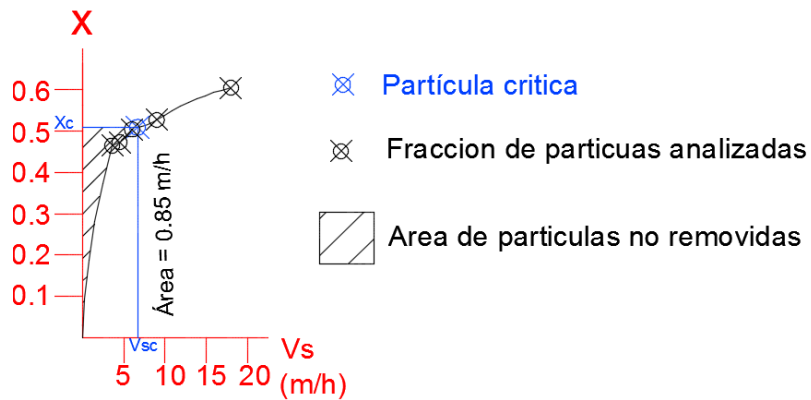
Fuente: Autores

- ✓ El dato resaltado corresponde a la información de la partícula crítica.
- ✓ El dato de carga superficial sale la velocidad de sedimentación analizada anteriormente esta velocidad se pasa a m/h

$$0.00185 \text{ m/s} \rightarrow 6.68 \text{ m/h}$$

Ahora relacionando un grafica de velocidad de sedimentación vs la Fracción de partículas con velocidad de sedimentación menor que Vsc. (X) se procede a calcular el área bajo la curva integral.

Grafica 21. Curva Integral para el análisis de partículas no removidas para la prueba No. 2, pasa tamiz # 200 y h=150 cm.



Fuente: Autores

Ya obtenidos los parámetros necesarios para la evaluación de la remoción se procede a calcular con la ecuación (22)

$$R_t = \left(0.491 + \frac{1}{6.68 \text{ m/h}} * 0.85 \text{ m/h} \right) * 100 = 61.82\% \text{ de remoción}$$

El anterior valor corresponde al (%) de remoción de las partículas a una altura de 150 cm.

Tabla 36. Resumen de las remociones totales de todos los tamices y alturas

	NTU0	H=50 cm	H=100 cm	H=150 cm
Tamiz #100, Prueba 1	58.3	47.39 %	49.42 %	51.97%
Tamiz #100, Prueba 2	39.3	55.56 %	56.98 %	51.82%
Tamiz #200, Prueba 1	30.5	55.13 %	53.44 %	42.7%
Tamiz #200, Prueba 2	38.8	65.78 %	53.29 %	66.13%
Tamiz pasa #200, Prueba 1	34.2	40.1%	40.87%	44.2%
Tamiz pasa #200, Prueba 2	38.7	44.56 %	53.11%	61.82%

Fuente: Autores

8.4. SEDIMENTACION TIPO II

Para el tipo de sedimentación Tipo II, es decir para partículas floculentas, podemos, como dijimos anteriormente aplicar la teoría de sedimentación para partículas discretas en este tipo de sedimentación de partículas, debido a que el tamaño de las partículas en suspensión es prácticamente constante.

En este tipo de sedimentación se evaluaron las partículas retenidas en los tamices #100, #200 y pasa 200, con el fin de saber el porcentaje de remoción de cada sistema a 1.75 m y un tiempo de retención de 60 min.

8.4.1. Prueba para tamiz #100

Se tomaron todos los puntos de la columna para evaluar la remoción (25cm, 50 cm, 75cm, 100 cm, 125cm, 150 cm y 175cm); así mismo se realizaron toma de muestra a determinados intervalos de tiempo y para cada una de ellas se halló la concentración de turbiedad con la ayuda del turbidímetro, los resultados se muestran en la tabla 38.

Tabla 37. Turbiedades experimentales para tamiz #100.

TAMIZ	100
Inicial UNT	58,3

t(min)	h= 25 cm	h= 50 cm	h= 75 cm	hc= 100 cm	h=125 cm	h=150 cm	h=175 cm
15	29,2	31,9	33,5	33,6	35,6	35,8	40
30	28,7	29,3	30,6	31,9	32,2	33,5	34,7
45	25,5	27,5	27,8	28,1	30	32,5	33,7
60	24,5	26,4	27,2	27,3	27,6	28,3	30,4
75	23,4	25,2	25,4	25,6	26,2	26,6	28
90	20,2	23,5	24,9	25	25,9	26,5	27,4
105	19,1	23,2	23,2	23,5	24,3	24,5	26,3
120	19	21,2	21,3	22,2	22,8	24,3	25,8

Fuente: Autores

Mediante la ecuación (24). Se determinará el % de sólidos suspendidos en remoción.

$$1 - X_C = \frac{NTU_0 - NTU_n}{NTU_0} \quad (24)$$

De acuerdo a lo anterior los resultados fueron:

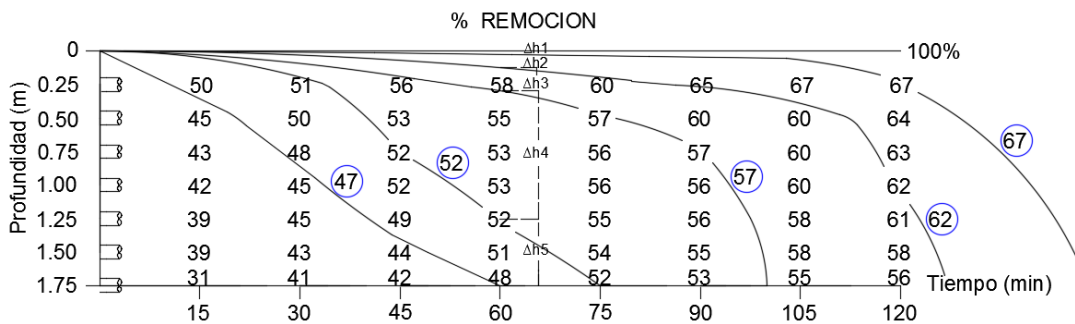
Tabla 38. Remociones porcentuales para tamiz #100

t(min)	h= 25 cm	h= 50 cm	h= 75 cm	hc= 100 cm	h=125 cm	h=150 cm	h=175 cm
15	49,91%	45,28%	42,54%	42,37%	38,94%	38,59%	31,39%
30	50,77%	49,74%	47,51%	45,28%	44,77%	42,54%	40,48%
45	56,26%	52,83%	52,32%	51,80%	48,54%	44,25%	42,20%
60	57,98%	54,72%	53,34%	53,17%	52,66%	51,46%	47,86%
75	59,86%	56,78%	56,43%	56,09%	55,06%	54,37%	51,97%
90	65,35%	59,69%	57,29%	57,12%	55,57%	54,55%	53,00%
105	67,24%	60,21%	60,21%	59,69%	58,32%	57,98%	54,89%
120	67,41%	63,64%	63,46%	61,92%	60,89%	58,32%	55,75%

Fuente: Autores

Tenidas las remociones se construye una gráfica general para evaluar la remoción del sistema de partículas, en la cual se grafica el tiempo en minutos vs la altura a la cual se generaron las muestras y en la parte superior se referencia una línea horizontal que representara el porcentaje removido. Se pone cada valor de remoción con su respectivo tiempo y altura. Y se traza una línea semiparabolica partiendo de 0 cruzando por la máxima remoción y finalizando sobre el eje del tiempo. Seguidamente trazaremos otras líneas disminuyendo la máxima remoción en 5, y así sucesivamente, estas líneas representaran un porcentaje de remoción (es aconsejable realizar estas líneas hasta mínimo el 50% de remoción), la gráfica resultante fue:

Grafica 22. Grafico general para remoción de partículas floculentas, tamiz #100



Fuente: Autores

Realizadas las líneas se midió la profundidad, Δh (cm), para cada línea de porcentaje de remoción para un tiempo de 60 min, dividimos cada una de estas alturas entre la altura máxima es decir 1.70 m, sacando el promedio de las eficiencias de la siguiente forma:

$$\bullet \frac{\Delta h_n}{\Delta h_{max}} \qquad \bullet \frac{E_{fn} - E_{f+1}}{2}$$

$$\Delta h1 \rightarrow \frac{0.02}{1.75} = 0.01 \qquad \Delta h1 \rightarrow \frac{100 + 67}{2} = 83.5$$

$$\Delta h2 \rightarrow \frac{0.10}{1.75} = 0.06 \qquad \Delta h2 \rightarrow \frac{67 + 62}{2} = 64.5$$

$$\Delta h3 \rightarrow \frac{0.17}{1.75} = 0.10 \qquad \Delta h3 \rightarrow \frac{62 + 57}{2} = 59.5$$

$$\Delta h4 \rightarrow \frac{0.96}{1.75} = 0.55 \qquad \Delta h4 \rightarrow \frac{57 + 52}{2} = 54.5$$

$$\Delta h5 \rightarrow \frac{0.49}{1.75} = 0.28 \qquad \Delta h5 \rightarrow \frac{52 + 47}{2} = 49.5$$

Finalmente, la remoción total del sistema, R (%), se dará de la ecuación (25)

$$R = \frac{\Delta h_n}{\Delta h_{max}} * \frac{E_{fn} - E_{f+1}}{2} \qquad (25)$$

Operando los anteriores resultados en la ecuación se obtuvo una remoción para cada altura y sumando todas estas remociones tendremos la remoción total del sistema de partículas para este caso el sistema del tamiz #100.

Tabla 39. Remoción total del sistema de partículas floculentas para tamiz #100

		$\Delta h_n / \Delta h_{max}$	$\frac{E_{fn} + E_{f+1}}{2}$	Remocion (%)
$\Delta h1$ (cm)	0.02	0.01	83.50	1.09
$\Delta h2$ (cm)	0.10	0.06	64.50	3.78
$\Delta h3$ (cm)	0.17	0.10	59.50	5.79
$\Delta h4$ (cm)	0.96	0.55	54.50	29.92
$\Delta h5$ (cm)	0.49	0.28	49.50	13.96
REMOCION TOTAL DEL SISTEMA (%)				54.54

Fuente: Autores

De lo anterior se tiene en resumen que para el tamiz #100 la Columna o torre de sedimentación genero una remoción del 54,54% de las partículas sólidas suspendidas.

8.4.2. Prueba para tamiz #200

Al igual que en la prueba anterior se tomaron todos los puntos de la columna para evaluar la remocion (25cm, 50 cm, 75cm, 100 cm, 125cm, 150 cm y 175cm); asi mismo se realizaron toma de muestra a determinados intervalos de tiempo y para cada una de ellas se hallo la concentracion de turbiedad con la ayuda del turbidimetro, los resultados fueron:

Tabla 40. Turbiedades experimentales para tamiz #200

T	Altura (m)						
	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
15	13.6	16.3	16.8	18	20.4	21.8	24.7
30	13.2	14.4	15.2	15.6	16	16.8	17.9
45	11.5	12.8	13.5	14.15	14.5	15.4	15.8
60	10.21	10.6	11.9	12.7	13.4	13.6	14
75	8.12	10	10.3	11.5	11.9	12.7	13.2
90	7.55	9.64	9.83	10.15	11	11.8	12.4
105	7.12	7.84	9.2	9.7	10.1	10.6	11.6
120	6.6	7.66	8.2	8.5	9.3	10.2	10.8

Fuente: Autores

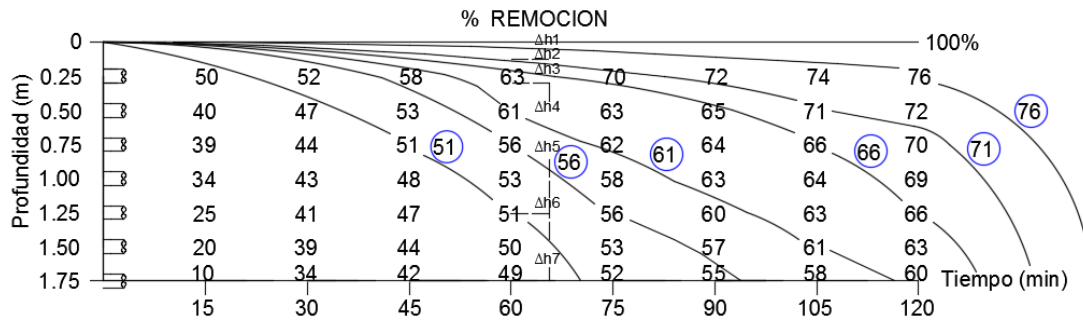
Realizando el mismo procedimiento realizado en la prueba anterior obtuvimos:

Tabla 41. Remociones porcentuales para tamiz #200

T	Altura (m)						
	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
15	50.18	40.29	38.46	34.07	25.27	20.15	9.52
30	51.65	47.25	44.32	42.86	41.39	38.46	34.43
45	57.88	53.11	50.55	48.17	46.89	43.59	42.12
60	62.60	61.17	56.41	53.48	50.92	50.18	48.72
75	70.26	63.37	62.27	57.88	56.41	53.48	51.65
90	72.34	64.69	63.99	62.82	59.71	56.78	54.58
105	73.92	71.28	66.30	64.47	63.00	61.17	57.51
120	75.82	71.94	69.96	68.86	65.93	62.64	60.44

Fuente: Autores

Grafica 23. Grafico general para remoción de partículas floculentas, tamiz #100



Fuente: Autores

Midiendo la profundidad, Δh (cm), para cada línea de porcentaje de remoción para un tiempo de 60 min y dividiendo cada una de estas alturas entre la altura máxima (1.70 m), y realizando el mismo ejercicio que se hizo con la prueba anterior obtuvimos la siguiente tabla:

Tabla 42. Remoción total del sistema de partículas floculentas para tamiz #200

	$\Delta h_n / \Delta h_{max}$	$\frac{E_{f_n} + E_{f_{n+1}}}{2}$	Remocion (%)
Δh_1 (cm)	0.04	0.02	88.00
Δh_2 (cm)	0.09	0.05	73.50
Δh_3 (cm)	0.07	0.04	68.50
Δh_4 (cm)	0.30	0.17	63.50
Δh_5 (cm)	0.25	0.14	58.50
Δh_6 (cm)	0.50	0.28	53.50
Δh_7 (cm)	0.49	0.28	48.50
REMOCION TOTAL DEL SISTEMA (%)			57.07

Fuente: Autores

De la cual podemos decir que para el tamiz #200 la torre de sedimentación genero una remoción del 57,07% de las partículas sólidas suspendidas.

8.4.3. Prueba para pasa tamiz #200

Al igual que en las pruebas anterior se tomaron todos los puntos de la columna para evaluar la remocion (25cm, 50 cm, 75cm, 100 cm, 125cm, 150 cm y 175cm); asi mismo se realizaron toma de muestra a determinados

intervalos de tiempo y para cada una de ellas se halló la concentración de turbiedad, los resultados fueron:

Tabla 43. Turbiedades experimentales para pasa tamiz #200

TAMIZ	<200
Inicial UNT	29.5

T	Altura (m)						
	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
15	14.8	18.4	20.3	21.9	22.8	23.5	26.9
30	11.24	13.3	14	14.7	15.4	22.3	24.6
45	8.29	10.8	12.6	14.3	14.7	18.5	19.8
60	7.05	8.5	10.6	12.5	13.8	13.9	16.3
75	6.43	7	8.4	10.8	11.8	12.8	14.2
90	5.93	6.34	7.13	7.6	9.22	10.75	11.03
105	5.6	6.21	6.4	6.87	7.8	8.69	9.8
120	5.31	5.32	5.6	5.62	6.3	7.4	8.05

Fuente: Autores

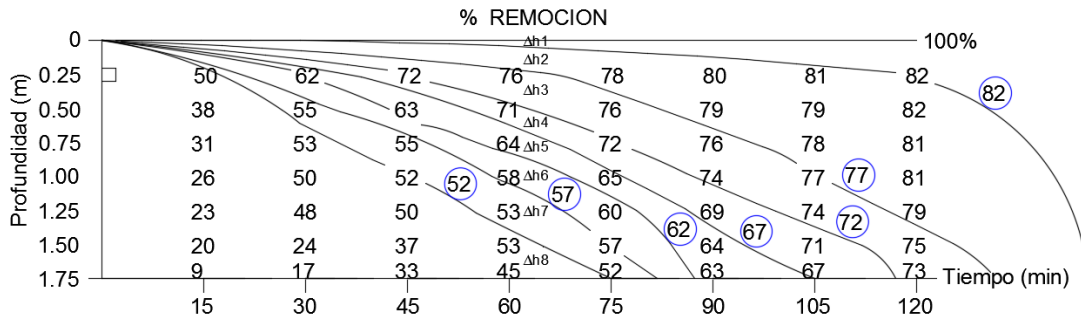
Realizando el mismo procedimiento realizado en las pruebas anteriores obtuvimos:

Tabla 44. Remociones porcentuales para pasa tamiz #200

T	Altura (m)						
	0.25	0.5	0.75	1	1.25	1.5	1.75
15	49.83	37.63	31.19	25.76	22.71	20.34	8.81
30	61.90	54.92	52.54	50.17	47.80	24.41	16.61
45	71.90	63.39	57.29	51.53	50.17	37.29	32.88
60	76.10	71.19	64.07	57.63	53.22	52.88	44.75
75	78.20	76.27	71.53	63.39	60.00	56.61	51.86
90	79.90	78.51	75.83	74.24	68.75	63.56	62.61
105	81.02	78.95	78.31	76.71	73.56	70.54	66.78
120	82.00	81.97	81.02	80.95	78.64	74.92	72.71

Fuente: Autores.

Grafica 24. Grafico general para remoción de partículas floculentas, pasa tamiz #200



Fuente: Autores

Midiendo la profundidad, Δh (cm), para cada línea de porcentaje de remoción para un tiempo de 60 min y dividiendo cada una de estas alturas entre la altura máxima (1.70 m), y realizando el mismo ejercicio que se hicieron con las pruebas anteriores se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 45. Remoción total del sistema de partículas floculentas para tamiz pasa #200

	$\Delta h_n / \Delta h_{max}$	$\frac{E_{fn} + E_{f+1}}{2}$	Remocion (%)
Δh_1 (cm)	0.04	0.02	91.00
Δh_2 (cm)	0.16	0.09	79.50
Δh_3 (cm)	0.25	0.14	74.50
Δh_4 (cm)	0.16	0.09	69.50
Δh_5 (cm)	0.21	0.12	64.50
Δh_6 (cm)	0.22	0.13	59.50
Δh_7 (cm)	0.34	0.19	54.50
Δh_8 (cm)	0.36	0.21	49.50
REMOCION TOTAL DEL SISTEMA (%)			58.14

Fuente: Autores

De la cual podemos decir que para el tamiz pasa #200 la torre de sedimentación genero una remoción del 58,14% de las partículas sólidas suspendidas.

Adicionalmente para los 3 tamices (#100, #200 y pasa #200) se puede saber la velocidad de sedimentación:

$$V_s = \frac{h}{t}$$

$$V_s = \frac{1.75m}{60min} = 0.03 \text{ m/min} \approx C_s$$

Según el coeficiente de seguridad (1.5-2) se haya la C_s con factor de seguridad:

$$C_s = \frac{V_s}{F_s} \rightarrow C_s = \frac{0.03m/min}{1.5} \rightarrow C_s = 0.02 \text{ m/min}$$

Y el tiempo de retención hidráulico por seguridad:

$$\theta_H = t * 1.5 \rightarrow \theta_H = 60min * 1.5 \rightarrow \theta_H = 90 \text{ min.}$$

9. ANALISIS DE RESULTADOS

En el evento de hallar la densidad específica de la arena cabe aclarar que la arena no fue previamente lavada a su análisis, en el caso en el que se le hubiese hecho el lavado al material el resultado hubiese sido más preciso pues con este se podrían haber eliminado el polvo y otras impurezas superficiales de las partículas, otro punto en el que hubiese sido más precisa la densidad usada para las pruebas en la torre, es decir en el cálculo del porcentaje de remoción es que se calculó una sola densidad para cada uno de los 3 sistemas de tamices, lo más adecuado, para haber tenido como se dijo menos incertidumbre en los resultados era para cada tamiz o tipo de arena haber calculado su propia densidad específica, aunque el resultado que se obtuvo de la densidad específica está dentro del rango en el que oscilan este tipo de material (1.5-2.5 g/cm³).

A medida que se dio el proceso de sedimentación, la columna se divide en las “zonas de sedimentación” que habíamos descrito antes (una zona de clarificación en la parte superior, seguida por una zona interfacial en la que se da en gran presencia la velocidad constante de sedimentación y en la parte más baja de la torre se evidencia la zona de transición y la de compactación en la que se ve en claridad la gran acumulación y espesamiento de material formando lodo; todo lo anterior nos lo corroboran los resultados de las pruebas de turbiedad tomada a cada muestra a los diferentes intervalos de tiempo en los que a medida que aumentaba el tiempo la turbiedad independientemente de la altura de referencia que se tuviera, iba disminuyendo.

Para las sedimentación con partículas discretas podemos comparar los resultados de un mismo tamiz y analizados a los mismos intervalos de tiempo, dicho esto compararemos los resultados de las 2 pruebas realizadas al tamiz 100, primero se debe tener en cuenta que por realizarse a intervalos de tiempo iguales y a las mismas alturas, la velocidad de sedimentación para ambas pruebas fue la misma, pero la velocidad de sedimentación de la partícula crítica es distinta para cada prueba en la primera fue de 41.74 m/h y en la segunda fue menor 39.16 m/h, podemos decir que si la velocidad es menor, la partícula tiene más tiempo para lograr sedimentarse, esto lo corroboran los resultados finales de la remoción del sistema, en lo cual la primera prueba removió el 47.39% y la segunda el 55.56% de las partículas. Otra causa de la remoción final fue el área que se generó en la curva integral para las partículas no removidas pero que pueden llegar a hacerlo, en la primera prueba el área generada fue de 3.67 y para la segunda 4.11, hay mayor cantidad de partículas que pueden llegar a removerse en la segunda prueba, esto se debe a que para la segunda prueba X_c es mayor lo que indica que tiene una mayor distancia longitudinal en la que puede removerse y una

menor velocidad como indicamos anteriormente, en la que como dijimos tendría un mayor tiempo para realizar su sedimentación. Este análisis también se puede hacer para los tamices #200 y pasa #200 pero como se dijo solo entre pruebas para los mismos tamices porque se tienen las mismas condiciones o características de análisis.

A medida que aumenta el tiempo de sedimentación los resultados nos muestran que la turbiedad va disminuyendo junto con la velocidad de sedimentación, mucho más en la zona de transición esto se debe al incremento del espesamiento y a la densidad en la suspensión, al disminuir la velocidad se incrementa la cantidad de sólidos gradualmente y se convierte en un círculo repetitivo, hasta que se produce la compactación en la zona final o más baja de la torre. En tanto que el porcentaje de remoción producido depende directamente de la velocidad de sedimentación mencionada, lo vemos claramente en las tablas de resultados para la remoción si comparamos dos muestras a la misma altura podemos ver que la remoción será mayor en aquella que tenga una velocidad de sedimentación menor.

En la sedimentación tipo II flocculenta se puede observar en los resultados que las turbiedades van aumentando a mayor profundidad, pero conforme el tiempo pasa disminuye, esto lo vemos visiblemente pues a medida que transcurre el sistema se va clarificando de arriba hacia abajo en la torre, lo anterior se ve reflejado en la tabla de remociones en lo que, para la altura o profundidad menor, 0.25 m, y para el tiempo máximo, 120 min, la remoción fueron las máximas, para el tamiz #100, del 67.41%, para el tamiz #200, del 75,82% y para el tamiz pasa #200, del 82%.

Se encontró que para el tamiz #100 la remoción total en el sistema fue menor que la del tamiz pasa #200, para el primero fue del 54.54% y para el segundo de 58.14%, el hecho de que el tamiz pasa#200 removiera más partículas se debe a que la diferencia entre la turbiedad inicial analizada con respecto a las tomadas en cada intervalo de tiempo era mayor con respecto a la del tamiz pasa #100, es decir que a mayor diferencia de turbiedad en el punto o altura analizada con respecto a la inicial, mayor es la remoción generada.

Para la sedimentación tipo II se determinó que la velocidad de sedimentación es de 0.03 m/min y por seguridad la carga superficial, es decir, la velocidad crítica mínima de sedimentación es de 0.02 m/min , con el fin de que las partículas lleguen a removerse. Y el tiempo de retención hidráulico por seguridad de 90 min, es decir el tiempo mínimo que debe pasar para asegurarse de que se genere una remoción eficiente.

10. CONCLUSIONES

La turbiedad realizada en una torre de sedimentación indica que existe una mayor concentración en ese punto o altura a la cual se hizo la muestra, por consiguiente, podemos concluir que a una mayor concentración de partículas habrá una mayor velocidad de sedimentación y, se tendrá una remoción menor de partículas.

Debido a que varios de los factores analizados como la velocidad de sedimentación, carga superficial, el número de Reynolds para determinar el flujo del sistema, dependen de la viscosidad del agua o del líquido en el que se encuentren y esta a su vez depende de la temperatura a la cual se encuentre; es importante conocer las condiciones ambientales en las cuales se realizan los procesos de sedimentación, el cual es mejor en condiciones en las que el agua se encuentra a una temperatura baja pues la viscosidad aumenta, disminuyendo su velocidad de sedimentación, logrando una mayor remoción.

La remoción de partículas Discretas se dio con mayor eficiencia en el tamiz #200 con un promedio entre las tres alturas y las dos pruebas de 56.07%

Para el caso de la sedimentación tipo II (floculenta) es necesario, para una buena eficiencia en la remoción de las partículas durante el proceso de sedimentación, que se haya realizado previamente un buen proceso de coagulación-floculación para poder sedimentar en gran parte las partículas coloidales que por su estabilidad no pueden ser sedimentadas con facilidad y a su vez el proceso de sedimentación debe ser eficiente para permitir que haya luego un buen proceso de filtración y así poder eliminar cualquier partícula u organismo que genere afectación para la salud; para este caso de sedimentación la torre en promedio generó una remoción del 56.58% de partículas sólidas suspendidas, lo que podría haber sido aún mayor si se hubiera realizado previamente el proceso de coagulación-floculación.

Relacionar todos estos factores en un modelo matemático general que nos permita evaluar con facilidad la remoción de partículas en suspensión es de alta complejidad, por tal motivo es importante una torre de sedimentación que nos ayude a predecir las eficiencias de reducción de los sólidos en suspensión en función de la concentración de partículas o la velocidad de sedimentación.

Para mejorar la eficiencia de los sedimentadores es necesario disponer de un flujo uniforme y laminar, en la torre de sedimentación este problema no ocurre, pero en sedimentadores de PTAP esta condición de flujo laminar se debe cuidar para no generar resuspensión de partículas, que están en

proceso de sedimentación. El patrón de flujo uniforme puede ayudar a la sedimentación de partículas en suspensión a una velocidad constante.

La carga superficial y tiempo de retención hidráulico son parámetros fundamentales a la hora de analizar remociones en un sedimentador pues de estos depende vitalmente la cantidad de partículas que puedan llegar a ser removidas y por tanto la eficiencia del sedimentador.

Se realizó una propuesta de guía de laboratorio conforme a las necesidades del estudio de la sedimentación, Se basó en el procedimiento experimental realizado. Esta se compone de unos objetivos, aspecto teórico, materiales y equipos utilizados y un procedimiento experimental explicado paso por paso el cual debe de ser profundizado por el docente encargado. Esta propuesta se asigna como un anexo a este documento

11. RECOMENDACIONES

- Antes de comenzar a realizar la prueba se recomienda realizarle un buen lavado a la torre, asegurándose de que no haya ningún tipo de material sólido dentro de esta que puedan llegar a afectar los resultados.
- Para la toma de muestras se sugiere purgar la toma antes de tomar la muestra que se va a analizar, con el fin de tomar una muestra sólida y pura.
- Para la sedimentación tipo II es recomendable trabajar con líneas porcentuales de remoción por encima del 50% ya que los porcentajes aceptables para remoción son a partir de este valor.
- Se recomienda seguir con la investigación de partículas floculantes. El prototipo actual, solo se destinó a la investigación de partículas discretas; por lo que se sugiere realizarse algún dispositivo mecánico o electrónico que simule el efecto de mezcla rápida y lenta dentro del dispositivo.
- Se invita realizar el estudio de los lodos generados por las prácticas. En una parte mirar la relación de pesos de muestra (peso de la muestra inicial vs lo que se deposita en el fondo. Por otra podría mirar que utilidad se le puede dar a estos lodos, puesto que normalmente son desechados generando un impacto ambiental negativo.
- Se podría crear un sistema de filtro que trate el agua producto de los laboratorios.

12. BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, Daniel Medina. 2014. *Tipos de piedra.* 2014.

Acrilux. 2013. Acrilicos Acrilux S.A. [En línea] 2013. [Citado el: 19 de Septiembre de 2016.] <http://acrilux.com.ec/files/PROPIEDADES.pdf>.

ARBOLEDA Valencia, Jorge. 2000. *Teoría y práctica de la purificación del agua.* Tercera. Bogotá : Mc Graw Hill, 2000. pág. 30.

blogspot.com.co. 2011. Tecnología de los Plásticos. [En línea] 5 de Julio de 2011. [Citado el: 24 de Septiembre de 2016.]

<http://tecnologiadelosplasticos.blogspot.com.co/2011/07/poliisopreno-caucho-natural-y-sintetico.html>.

Calidad del agua para consumo público: caracteres físico-químicos. En estudio sanitario del agua. **Espigares Garcia y FERNANDEZ FREUGET. 1999.** Granada : Universidad de Granada, 1999, págs. 85 - 114.

ciencias, Academia nacional de. 2007. Koshland science museum. *Procesos de tratamiento.* [En línea] 2007. <https://www.koshland-science-museum.org/water/html/es/Treatment/Treatment-Processes.html>.

Durand, Pablo Molinero. 2013. *Columna de sedimentación.* Perú : Six Sigma Green Belt., 2013.

Guiles, Ronald V., Evett, Jack B. y Liu, Cheng. 1994. *Mecánica de los fluidos e Hidráulica.* Tercera. Madrid : McGraw, 1994.

imagua. 2013. IMAGUA Water Technologies SL. *IMAGUA Water Technologies SL.* [En línea] 2013. [Citado el: 16 de Septiembre de 2016.] <http://www.imagua.es/pages/index/sedimentacion>.

INVIAS. 2007. ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE SUELOS POR TAMIZADO. *I.N.V. E 123.* 2007.

—. **2013.** DETERMINACION DE LA GRAVEDAD ESPECIFICA DE LAS PARTICULAS SOLIDAS DE LOS SUELOS Y DEL LLENANTE MINERAL, EMPLEANDO UN PICNOMETRO CON AGUA. 2013.

—. **2007.** DETERMINACIÓN DE LA GRAVEDAD ESPECÍFICA DE LOS SUELOS Y DEL LLENANTE MINERAL. *I.N.V.E 128-07.* 2007.

Jorge, CASADO Cruz. 2007. *APLICACION DE ENMIENDAS A LA LEY DE AGUA POTABLE SEGURA EN SISTEMAS DE LA AUTORIDAD DE ACUEDUCTOS Y*

ALCANTARILLADOS, REGION ESTE. Ciencias Ambientales, Universidad de Turabo. Gurabo : s.n., 2007. pág. 10.

López Pérez, María Fernanda. 2010. Sedimentación floculenta. *Universidad Politecnica de Valencia*. [En línea] 11 de Mayo de 2010. [Citado el: 13 de Septiembre de 2016.] <http://politube.upv.es/play.php?vid=3732>.

Maldonado, Victor. 2002. *SEDIMENTACIÓN Capitulo 7*. 2002.

MINISTERIO DE SALUD Y PROTECCIÓN SOCIAL. 2013. *INFORME NACIONAL DE LA CALIDAD DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO AÑO 2013 CON BASE EN EL IRCA*. Bogotá : s.n., 2013.

MONTOYA, Carolina, y otros. 2011. EFECTOS DE EL INCREMENTO DE TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA SOBRE LA EFICIENCIA DE PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACION. [En línea] Diciembre de 2011. [Citado el: 29 de 04 de 2016.] http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1794-12372011000200011.

Mott, Robert L. 2006. *Mecania de Fluidos*. Sexta. s.l. : pearson, 2006.

NARRO, E. 1994. *Fisica de suelos*. Primera. 1994.

Ortega, Andres Blanco. 2001. Sistemas Dinámicos: Elementos, sistemas y leyes físicas para modelas. 2001. pág. 17.

Perez, Jorge Arturo. 1981. *Sedimentacion*. Medellin : s.n., 1981.

PIGNATTA, Danilo Andrés Ríos. 1998. UTILIZACIÓN DEL PARÁMETRO "EFICIENCIA" EN REMOCION DE TURBIEDAD DE LOS SEDIMENTADORES. [En línea] AIDIS, 5 de NOV de 1998. [Citado el: 27 de Abril de 2016.] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/peru/urgapa006.pdf>.

policarbonato, Acrilico y. 2013. Acrilico y policarbonato.com. [En línea] 2013. [Citado el: 26 de Septiembre de 2016.] <http://www.acrilico-y-policarbonato.com/acrilico-propiedades.html#estabilidaddimensional>.

QuimiNet. 2012. QuimiNet.com Informacion y negocios segundoa segundo. [En línea] 2 de mayo de 2012. [Citado el: 18 de Septiembre de 2016.] <https://www.quiminet.com/articulos/lo-mas-importante-a-saber-sobre-las-bridas-para-tuberias-2727017.htm>.

Restrepo Osorno , Hernán Alonso. 2009. *EVALUACIÓN DEL PROCESO DE COAGULACIÓN – FLOCULACIÓN DE UNA PLANTA DE TRATAMIENTO DE AGUA POTABLE*. Medellin : s.n., 2009.

- RIOS Pignatta, Danilo Andrés. 1998.** UTILIZACIÓN DEL PARÁMETRO "EFICIENCIA" EN REMOCION DE TURBIEDAD DE LOS SEDIMENTADORES. [En línea] AIDIS, 5 de NOV de 1998. [Citado el: 27 de 4 de 2016.] <http://www.bvsde.paho.org/bvsaidis/tratagua/peru/urgapa006.pdf>.
- RODRÍGUEZ, GUILLERMO REINOSO. 2013.** 800 municipios toman agua con riesgos para la salud. *EL TIEMPO*. 1 de Junio de 2013.
- ROMALHON, RUBENS SETTE. 2003.** *Tratamiento de Aguas Residuales*. Segunda. SEVILLA : REVÉRTE, 2003. pág. 93.
- Santamaria Alzate, Felipe. 2016.** *Curva Integral* . Bogota : s.n., 2016.
- Sedeño , Moises Roman . 2011.** "Diseño y Construcción de un Prototipo Mecatrónico para Medir y Registrar". Cuernavaca , México : s.n., 20 de Junio de 2011.
- Silberberg, Martin. 2002.** *Química : La naturaleza molecular de la materia y el cambio*. Segunda . s.l. : MCGRAW-HILL, 2002. pág. 24.
- SL, IMAGUA Water Technologies. 2013.** imague. [En línea] 2013. <http://www.imagua.es/pages/index/sedimentacion>.
- USGS. 2015.** USGS. [En línea] 15 de Mayo de 2015. [Citado el: 15 de Septiembre de 2016.] <http://water.usgs.gov/gotita/characteristics.html>.
- VEGA Guzman, Juan Carlos y Villacreses Zambrano, Jose Alfredo. 2006.** Estudio del Fenomeno de sedimentacion en el tratamiento del agua en tres casos de estudio". [En línea] 2006. [Citado el: 2016 de Mayo de 1.] <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/3406/1/5929.pdf>.
- VILLACRECES, JA. 2009.** *EVALUACION DE DOS CASOS DE ESTUDIO DEL FENOMENO DE SEDIMENTACION EN EL TRATAMIENTO DEL AGUA*. Guayaquil : s.n., 2009. págs. 1-10.
- Wikipedia. 2016.** Wikipedia la enclopedia libre. [En línea] 8 de Agosto de 2016. [Citado el: 13 de Septiembre de 2016.]

ANEXO A.

Propuesta de guía para desarrollar un laboratorio para el estudio de
remoción en sedimentación tipo I y Tipo II