



**ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO EN FILTRO DE GRAVA DE
FLUJO ASCENDENTE EN CAPAS-FGAC CON AGUA CRUDA DEL RÍO CAUCA**

ESTEFANÍA RUIZ SOLANO

**Trabajo de Grado presentado como requisito
parcial para optar al título de Ingeniera Sanitaria y Ambiental**

Director: Ing. MSc. PhD. Luis Darío Sánchez, Instituto Cinara

**ESCUELA DE INGENIERÍA DE LOS RECURSOS NATURALES Y DEL
AMBIENTE
UNIVERSIDAD DEL VALLE
SANTIAGO DE CALI
2016**

Dedicado a mis padres, hermanas y amigos, por la ardua tarea de un proceso de formación que nunca termina y a las personas que lejos y cerca supieron comprender y soportar este camino. "Solo hay dos errores que se cometen en el camino: No empezar y no llegar hasta el final."

CONTENIDO

	Pág.
1 INTRODUCCIÓN	3
2 JUSTIFICACIÓN	5
3 OBJETIVOS	6
3.1 General	6
3.2 Específicos	6
4 MARCO TEÓRICO	7
4.1 Modelos de flujos en reactores	8
4.2 Ensayo con trazadores	11
4.3 Eficiencia en sistemas FGAC	13
5 METODOLOGÍA	16
5.1 Descripción de unidad de estudio FGAC	16
5.2 Procedimiento para la toma de datos	17
5.3 Ensayo de trazador	18
5.3.1 Procedimiento para el ensayo de trazador	18
5.4 Aforo, lectura de pérdida de carga y turbiedad	20
5.5 Caracterización de los medios filtrantes	20
5.5.1 Prueba de granulometría	20
5.5.2 Porosidad de la grava	21
5.6 Eficiencias de Tratamiento	22

5.6.1	Parámetros y Frecuencias	22
5.6.2	Diseño de formatos para recopilación de información.	23
6	ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN	24
6.1	Caracterización de los medios filtrantes	24
6.2	Análisis del ensayo de trazador capa por capa y longitud total de lecho	26
6.2.2	Modelo simplificado de Wolf y Resnick.	31
6.2.3	Índice de Morril	32
6.2.4	Modelo de reactores completamente mezclados en serie	33
6.2.5	Número de Peclet	35
6.3	Eficiencia de remoción de sólidos en los FGAC	36
6.4	Relación entre el número de reactores en serie y la eficiencia	40
6.4.1	Pérdida de carga	41
7	CONCLUSIONES	43
8	BIBLIOGRAFÍA	45

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Remociones típicas en filtros gruesos de flujo ascendente.	8
Tabla 2. Tipo de flujo en reactores. Adaptado de (Crittenden, 2012)	10
Tabla 3. Resumen Índices utilizados para análisis de la curva de trazadores	14
Tabla 4. Características de la unidad de experimentación FGAC	17
Tabla 5. Pasos para el cálculo de densidad del medio filtrante	22
Tabla 6. Frecuencia de medición de parámetros	23
Tabla 7. Caracterización de grava	24
Tabla 8. Volumen de agua y grava en el FGAC	25
Tabla 9. Parámetros utilizados en análisis de la curva de tendencia	27
Tabla 10. Resultados v_f (0.5 mh^{-1})	27
Tabla 11. Resultados del Modelo Wolf Resnick	31
Tabla 12. Resultados Índice de Morril	32
Tabla 13. Resultado del modelo de reactores completamente mezclados en serie	33
Tabla 14 Número de Reynolds (Re) para cada tamaño de grava	34
Tabla 15. Valores para el Número de Peclet y de dispersión	36
Tabla 16. Turbiedad media para las tres carreras de filtración	39
Tabla 17. Ecuaciones generales propuestas para predecir eficiencia	41
Tabla 18. Pérdida de carga	42

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Concentración del trazador en el efluente de un reactor. Maldonado (1992)	12
Figura 2. Unidad de filtración –FGAC	16
Figura 3. Esquema Ensayo de Trazador	19
Figura 4. Comportamiento trazador en la longitud total de lecho y por cada tamaño de grava capa por capa $v_f 0.5 \text{ mh}^{-1}$.	26
Figura 5. Variación del número de reactores en serie a través del lecho de grava	35
Figura 6. Remoción SST para las tres v_f	40

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Formatos para recopilación de información	48
Anexo B. Ensayo de trazador	49
Anexo C. Comportamiento trazador capa a capa y a través de la longitud total	52
Anexo D. Escala de comparación visual de forma de los granos y valores de esfericidad	54
Anexo E. Curvas experimentales y curvas teóricas de los reactores completamente mezclados en serie	55
Anexo F. Lectura de pérdida de carga	58
Anexo G. Lectura de Turbiedad en campo	61
Anexo H. Calculo de k	68

RESUMEN

La filtración en múltiples etapas, FiME es una alternativa tecnológica para mejoramiento de la calidad de agua de consumo que actualmente es aprovechada en comunidades rurales. FiME consta de tres etapas de tratamiento: Filtro Grueso Dinámico (FGDi), Filtro de grava de flujo ascendente (FGA) que son pre-tratamientos en medios granulares de grava y Filtro Lento en Arena (FLA) como etapa de remoción microbiológica. Este trabajo de grado se orientó a entender el comportamiento hidráulico del FGA en capas a escala piloto. El estudio se realizó en la Estación de Investigación y Transferencia de Tecnología del Instituto Cinara, localizada en predios de la Planta de Tratamiento de Agua Potable (PTAP) de Puerto Mallarino –EMCALI de Cali.

Los resultados del modelo simplificado de Wolf Resnick mostraron que en cada capa de grava se presentó flujo dual (pistón y mezcla completa), con presencia de zonas muertas. Los resultados muestran para las tres velocidades de filtración (v_f), que para el tamaño de grava de 22-24 mm (capa 1) presentó mezcla completa entre 55-77%, fracción pistón entre el 23-31% y presencia de zonas muertas en un 15% aproximadamente. La tendencia de flujo dual se hizo recurrente en el tamaño de grava de 12.7 a 19.07 mm (capa 2), con fracción de mezcla completa entre 34-84%, de flujo a pistón entre 16-46% y alta presencia de zonas muertas 19%, el tamaño de grava 6.35 a 12.7 mm evidenció flujo dual con mayor porcentaje de mezcla completa, 52-64% frente al flujo pistón de 34-36% y con existencia de zonas muertas 13-14%. Para la última capa, diámetro de grava entre 4.75 a 6.35 mm, la fracción mezclada varió entre 57-60% y el flujo pistón entre 40-43%, a diferencia de las demás capas, ésta no presentó zonas muertas. El comportamiento hidráulico del reactor estudiado como una unidad completa, muestra que el flujo predominante es pistón, con una que varió entre el 49 y 50%, frente a una fracción mezclada de 37%. Para las tres v_f ; las zonas muertas variaron entre el 13 y 14%.,

El modelo de reactores en serie mostró un valor de $n = 10$ para la totalidad del lecho filtrante a una $v_f = 0.5 \text{ mh}^{-1}$; siendo este el mayor valor frente a los demás calculados, este valor fue igual al obtenido por Sánchez, 2016. Para $v_f 0.75$ y 1.0 mh^{-1} el número de reactores en serie fue de $n = 6$ y $n = 4$ respectivamente. El mayor número de reactores en series n para la longitud total del lecho indica un mejor comportamiento hidráulico del reactor al incrementar la longitud de la grava y el mejor desempeño hidráulico a menor v_f se puede explicar por un menor número de Reynolds y mayor cercanía al régimen de flujo laminar.

La turbiedad de salida del FGAC, estuvo entre 10.3-12.4 UNT que pueden facilitar la operación de sistemas de filtración lenta en arena acorde a las recomendaciones de Galvis *et al.* (1999) y Di Bernardo y Sabogal Paz, 2008 quienes establecieron un valor alrededor de 10 UNT para los efluentes de los FGAC. El mejor desempeño en remoción de SST para las tres v_f analizadas, se presentó en la capa 3, (grava de 6.35 -9.53 mm) con una eficiencia entre el 28 al 30%, el comportamiento está en armonía con los resultados obtenidos por el método simplificado de Wolf Resnick, que no mostró zonas muertas en esta capa de grava.

Palabras Claves: Filtración en Múltiples Etapas, Filtro en grava de flujo ascendente en capas, comportamiento hidráulico, índices de correlación, modelos de reactores.

1 INTRODUCCIÓN

En la búsqueda de soluciones para las necesidades de mejoramiento de la calidad de agua en asentamientos humanos que utilizan fuentes superficiales, se desarrolló la tecnología de filtración en múltiples etapas (FiME). Esta tecnología consiste de una combinación de etapas de tratamiento que incluyen la filtración en grava dinámica, FGDi, la filtración en grava de flujo ascendente, FGAC y la filtración lenta en arena, FLA. La eficiencia de la filtración en los sistemas FiME, no solo depende del tamaño del medio filtrante en particular y de la concentración de los sólidos suspendidos, sino también del tamaño y densidad de las partículas, la velocidad de filtración y de la actividad biológica (Galvis G. , 2000).

En Colombia, en la década del 2000 se construyeron un mayor número de sistemas FiME a escala real. En el Valle del Cauca, Colombia, la tecnología más utilizada para el pretratamiento de agua rural en sistemas de abastecimientos es la FGAC, posiblemente debido a la guía en la selección de tecnología desarrollada por Cinara y el proyecto de transferencia de tecnología (Gálvis et al. 1998). Un estudio reciente identificó 62 PTAPs FiME de un total de 115 en el Valle del Cauca (Veldt y Burger, 2015).

Para una comprensión de la eficiencia del proceso de tratamiento, es fundamental entender la eficiencia hidráulica del reactor de este tipo de unidades; pues las alteraciones en el comportamiento del agua en la unidad pueden corresponder a la presencia tanto de cortocircuitos hidráulicos como de zonas muertas, los cuales pueden modificar las líneas de flujo y afectar la sedimentación que es uno de los mecanismos predominantes en este tipo de sistemas (Wegelin et al. 1987) y puede representar efectos apreciables en la eficiencia de la unidad.

En un reactor hidráulico bajo condiciones reales de funcionamiento, se pueden presentar condiciones de flujo no ideal, es decir presencia de flujo mezclado y a pistón acompañado de cortocircuitos, zonas muertas y corrientes de inercia, de ahí que el entendimiento del

comportamiento hidráulico a través de la longitud del lecho de grava es importante para revisar el efecto sobre el proceso de tratamiento en este tipo de unidades.

Investigaciones han demostrado que la eficiencia hidráulica de FGACS (Filtración Gruesa Ascendente en Serie) pueden alcanzar mayor eficiencia hidráulica que la filtración en grava de flujo horizontal (Ochoa & Gálvis, 1996), sin embargo la altura de lecho óptima no se ha estudiado, siendo clave por los impactos en los costos de inversión y en la eficiencia durante la operación y mantenimiento de tales unidades. Este trabajo de grado analizó las condiciones de operación del filtro de grava de flujo ascendente como sistema de pretratamiento de agua potable con tecnología FiME en la planta piloto de la PTAP de Puerto Mallarino en la ciudad de Cali, alimentada con agua cruda del río Cauca. Se emplearon modelos matemáticos como la curva de tendencia del trazador, el modelo de Wolf Resnick, el número de reactores en serie, junto a parámetros de correlación e índices adimensionales bajo la influencia de tres velocidades de filtración.

2 JUSTIFICACIÓN

El deterioro de las cuencas por deforestación y erosión, además de la descarga de aguas residuales sin tratar en las fuentes, hacen que los sistemas de tratamiento de agua potable cada día requieran mayores exigencias en operación y mantenimiento. Las soluciones ya se están adoptando en los sistemas FiME, sin embargo están afectando los costos del servicio y la sostenibilidad de la tecnología (Sánchez, 2016).

Este proyecto de grado busca profundizar en el entendimiento de la filtración en grava de flujo ascendente en capas, analizando el sistema como reactor hidráulico para revisar su posible efecto en la eficiencia de remoción de sólidos suspendidos y turbiedad. La operación de los FGAC está relacionada con el control de la velocidad de filtración, pérdida de carga y el control de la calidad de agua efluente. El mantenimiento está asociado con la limpieza de las unidades y las acciones tendientes a prevenir o reparar daños (Galvis *et al.*, 1999).

3 OBJETIVOS

3.1 General

Contribuir al entendimiento del proceso de filtración en grava de flujo ascendente en capas, profundizando en el comportamiento hidráulico de las unidades bajo la influencia de la velocidad de filtración y su eficiencia de tratamiento.

3.2 Específicos

- Revisar el comportamiento hidráulico en el FGAC para diferentes velocidades de filtración.
- Medir el comportamiento hidráulico para cada tamaño de grava por capa de grava en el filtro.
- Determinar las eficiencias del FGAC en las diferentes longitudes de lecho para sólidos suspendidos totales y turbiedad.

4 MARCO TEÓRICO

En 1973 como resultado de la evaluación de problemas en el sector del agua en países en vía de desarrollo se identificó la filtración lenta en arena (FLA), como posible solución y se le asignó la máxima prioridad a la investigación sobre esta tecnología en diferentes condiciones climáticas. Sin embargo, los resultados del proyecto mostraron que el mantenimiento era un problema debido a que los sistemas tenían dificultades para tratar mayores niveles de turbiedad, característica común de muchos ríos tropicales, por el aumento de la erosión en las cuencas abastecedoras (Visscher, 2006).

Los resultados prometedores que arrojó ese estudio llevaron a iniciar el desarrollo de una investigación más profunda y como resultado se estableció una tecnología de tratamiento de agua la FiME, una combinación de filtración de grava y FLA. La inclusión de la filtración en grava permitió identificar las importantes reducciones en parámetros físico-químicos y microbiológicos.

Los filtros de grava permiten mejorar la eficiencia en remoción y la operación de los FLA, porque son efectivos al minimizar el número de partículas grandes y a disminuir la concentración de las más pequeñas. En este sentido remociones importantes en sólidos suspendidos pueden alcanzar hasta un 95%, al igual que en hierro, manganeso y coliformes fecales (Galvis, 1999).

Galvis et al. (1999) mostraron que el aumento de la profundidad del lecho de filtración incrementa la capacidad de almacenamiento de sedimentos y la eficiencia de la remoción, pero podría hacer la limpieza hidráulica más compleja, sin embargo una altura óptima del lecho no ha sido reportada en términos de la eficiencia hidráulica ligada al proceso de tratamiento. La altura de un filtro grueso ascendente es usualmente inferior a 2 m. En la Tabla 1 se presentan remociones típicas encontradas en sistemas de FGAC con fuentes superficiales de valle y de ladera (Galvis, 1999). Los filtros gruesos operaron con

velocidades de filtración entre 0.3 mh^{-1} y 0.75 mh^{-1} , con lechos filtrantes entre 1.0 y 1.55 m de longitud.

Tabla 1. Remociones típicas en filtros gruesos de flujo ascendente.

Parámetro	Reducción típica
Sólidos suspendidos	Alcanza hasta el 95%, siendo 90% el valor comúnmente reportado en fuentes superficiales con altos contenidos de material suspendido, en el rango de 50 a 200 mg/L. En fuentes con material suspendido de rango de 5 a 50 mg/L, se reportan remociones del orden del 50 al 90%.
Turbiedad	Entre 50 y 80% en fuentes superficiales de valle, siendo mayores para los FGAS. En fuentes superficiales de ladera la remoción está en el rango 50 - 90%.
Color	Entre 20 y 50%
Hierro y Manganeseo	Alrededor del 50%.
Coliformes Fecales	Reducciones entre 0.65 y 2.5 unidades log, siendo mayor para Filtro grueso ascendente en serie (FGAS) tratando agua con contaminación bacteriológica en el rango 20000 a 100000 UFC/100 ml y contenido de sólidos suspendidos entre 20 y 200 mg/l.

Fuente (Galvis, 1999)

Para analizar el comportamiento hidráulico es necesario identificar qué tipo de reactor se presenta durante el tratamiento del agua. El reactor puede clasificarse según el patrón de operación, características hidráulicas y las condiciones de funcionamiento en la entrada y la salida (Crittenden, 2012). Para el análisis se emplean modelos de flujo tal como se describe seguidamente.

4.1 Modelos de flujos en reactores

En las unidades de tratamiento el flujo puede ser de dos tipos: discontinuo o intermitente y continuo. El flujo discontinuo es el menos habitual, consiste en llenar la unidad y dejar un tiempo el fluido en ella mientras se produce el proceso correspondiente, que puede realizarse con o sin mezcla, evacuar la unidad y repetir el ciclo. Este tipo de flujo, en la mayoría de los casos, no es práctico y los procesos en una PTAP son de flujo continuo y es

el más utilizado en las plantas de gran escala, debido a los grandes volúmenes de agua procesada.

Los reactores utilizados para llevar a cabo reacciones pueden ser caracterizados como ideal o no ideal, de acuerdo con la naturaleza de las condiciones hidráulicas y de mezcla. En los reactores no ideales, las condiciones hidráulicas y mezcla tienden a ser complejos (por ejemplo, la mezcla en un gran lago, o una cámara de contacto de cloro). En los reactores ideales se supone que hay mezcla uniforme y las condiciones hidráulicas que dependen de la configuración específica del reactor (Crittenden, 2012).

Los modelos para reactores de flujo continuo, son útiles para obtener una comprensión del comportamiento de los reactores que se utilizan en los sistemas a escala real, puesto que se construyen fácilmente y con frecuencia proporcionan estimaciones prácticas del comportamiento. Hay dos sub-tipos de flujos para esta categoría, flujo completamente mezclado y flujo a pistón.

En un reactor de flujo completamente mezclado -RFCM- se considera que el contenido se mezcla por completo, es así como se deduce que el efluente contiene precisamente la misma composición que el contenido del reactor. Por lo tanto, la velocidad de reacción en un RFCM procede de acuerdo con la concentración del efluente, lo que resulta en la necesidad de un volumen de reactor más grande en comparación con un reactor de flujo a pistón -RFP-. En un RFP el fluido se mueve como una fracción y bajo condiciones de flujo ideal no hay mezcla en la dirección axial, y no hay ni gradientes de velocidad ni gradientes de concentración en la dirección perpendicular al flujo. Los RFP de interés en el proceso de tratamiento de agua típicamente tienen un área de sección transversal constante (por ejemplo, tuberías o canales), aunque un RFP puede tener un área de sección transversal variable, tal como un río de forma irregular. Un RFP por lo general requiere menos volumen de reactor que un RFCM para un grado equivalente de remoción (Crittenden 2012). La Tabla 2 contiene las definiciones de manera resumida de los modelos de flujo de reactores.

Tabla 2. Tipo de flujo en reactores. Adaptado de Crittenden (2012)

Tipo de Reactor	Definición
Reactor de flujo ideal	Los reactores se utilizan para propósitos de modelado. El tipo de flujo es ideal (teórico) y se pueden identificar dos tipos: mezcla completa o ninguna mezcla de reactivos o productos en la dirección del flujo.
Reactor de flujo no ideal	La distribución del tiempo de residencia en el reactor no cumple con los supuestos ideales. A menudo, los reactores que se utilizan en la práctica son del tipo no ideales.
Reactor de flujo discontinuo o tipo batch (RFD)	Su contenido está perfectamente agitado y su composición es igual en todo el reactor. La composición varía con el tiempo hasta alcanzar una conversión final o de equilibrio del reactivo para las condiciones establecidas, se debe vaciar total o parcialmente el reactor e incorporar una nueva porción de masa si se quiere seguir con productos de reacción.
Reactor de flujo completamente mezclado (RFCM)	La velocidad de reacción procede a la misma tasa en todas las partes en el reactor, y las concentraciones en el reactor son las mismas del efluente. Esta composición no varía en el tiempo, por lo que se considera en estado estacionario.
Reactor de flujo pistón (RFP)	Un reactor ideal en el que el fluido se mueve a través del reactor en fracciones y el fluido no se mezcla con los elementos del fluido en ningún sentido. Como resultado, la velocidad de reacción y las concentraciones de los reactivos disminuyen a medida que el fluido se mueve a lo largo del sistema RFP. Excepto para las reacciones de orden cero, la composición en cualquier tiempo de viaje en el reactor es idéntica a la composición en el RFD después de haber transcurrido el mismo período de tiempo.

Para identificar el comportamiento hidráulico en las unidades de tratamiento es útil realizar ensayos con trazadores.

4.2 Ensayo con trazadores

Las pruebas con trazadores han sido usadas durante muchos años como medio para determinar el flujo en canales, ríos, reservorios y en acuíferos subterráneos. En plantas de tratamiento su uso ha sido limitado, pero es útil para determinar la distribución del flujo en unidades paralelas y evaluar las condiciones hidráulicas puesto que permite determinar los tiempos reales de retención y sus principales características como: tipo de flujo, zonas muertas y cortocircuitos hidráulicos. Los modelos de reactores son útiles para conocer el comportamiento hidráulico y las deficiencias en forma previa a su construcción, lo cual es de utilidad práctica y fundamental para un buen proceso de tratamiento.

Un ensayo de trazadores consiste en agregar la sustancia trazadora en el afluente del reactor o filtro que se quiere analizar, con una concentración conocida y determinando a la salida la forma como dicha concentración se distribuye a través del tiempo (Pérez C & Gálvis, 1990). Antes de elegir el tipo de trazador que se utilizará, se debe verificar la concentración de esta sustancia en el agua cruda y seleccionar aquella que se presenten en concentraciones constantes o muy bajas. Es conveniente seleccionar un trazador conservativo, de forma que la concentración total que se determine a la salida será sensiblemente igual a la que se aplique a la entrada.

Es común utilizar como sustancia trazadora en las evaluaciones de sistemas de pre-tratamiento de agua el ion cloruro obtenido de la aplicación del cloruro de sodio. El cloruro de sodio o sal de cocina (99%) es de fácil obtención y bajo costo. Así mismo, la determinación de la concentración a la salida del reactor es rápida y fácilmente medida a través de la conductividad eléctrica.

Ha sido práctica común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración del trazador y relacionar sus diferentes parámetros con condiciones de flujo (Figura 1).

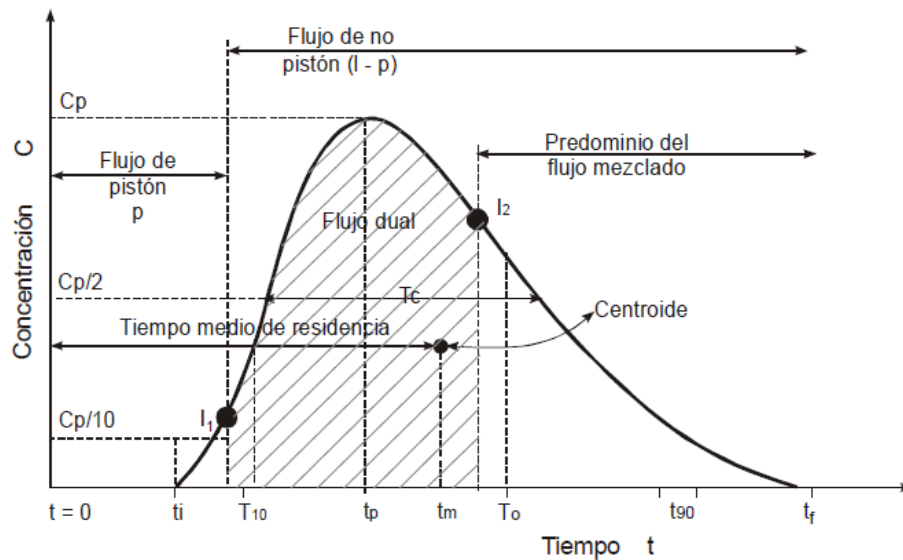


Figura 1. Concentración del trazador en el efluente de un reactor. Maldonado (1992)

Donde:

t_i = tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente.
t₁₀ = tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador
t_p = tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.
t_m = tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad del trazador.
t_o = tiempo medio de retención o tiempo teórico de retención = V/Q .
t₉₀ = tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.
t_f = tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador al reactor.
C_o = concentración inicial.
C_p = concentración máxima a la salida.

Observar la forma que toma la curva de trazadores brinda una primera indicación del comportamiento hidráulico del reactor que se estudia (Pérez C & Galvis, 1990). Los investigadores en el área del tratamiento de agua han entendido que la distribución del tiempo de residencia (DTR) de un reactor es importante. Como resultado de ello, las curvas de trazador se han utilizado para caracterizar estos reactores y ayudar en la comprensión de su funcionamiento. Un número de índices se han utilizado para caracterizar reactores y sus resultados con ensayos de trazadores, algunos de los términos más utilizados se resumen en la Tabla 3 y está claro que τ tiene un gran significado. De los índices restantes, los más importantes son probablemente; la dispersión (d); el número de Peclet (Pe); el número equivalente de reactores en serie (n), y el índice de Morril (IM). Pe , d y n son importantes

porque estos pueden ser utilizados en los modelos de un solo parámetro como una medida integral de la dispersión (Crittenden, 2012).

En investigaciones medioambientales son usados Pe y d , siendo importante entender la relación entre estos dos parámetros. Para el modelo de sistema cerrado, se supone que se produce flujo a pistón a la entrada y salida del reactor, mientras que en el flujo mezclado se presenta dispersión dentro del reactor. Para el modelo de sistema abierto, se supone que las condiciones de flujo disperso están presentes a lo largo del sistema, es decir, el reactor es esencialmente un segmento de flujo con características comunes para el flujo de entrada y salida. Las diferencias entre estos modelos no son significativas cuando $Pe > 40$ ($d < 0.025$) Crittenden (2012). Básicamente en la modelación de un proceso se busca describir el fenómeno con operaciones matemáticas sencillas para ayudar a analizar, comprender y predecir el comportamiento de un proceso físico relativamente complejo en función de las variaciones de los parámetros que lo gobiernan.

4.3 Eficiencia en sistemas FGAC

La unidad de FGAC está conformada por lechos de grava de diferente tamaño gruesa en el fondo, a fina en la superficie. La ventaja en esas unidades es que las partículas más pesadas son removidas primero en el fondo del filtro donde se localiza un múltiple distribuidor de caudal, el cual también sirve como sistema de drenaje en el momento del lavado del filtro, lo que facilita el mantenimiento del mismo. La limpieza se hace cuando la pérdida de carga es del orden de 15 y 20 cm, realizando descargas sucesivas de fondo; sin embargo, se ha demostrado que descargas intermedias con 10 cm de pérdida de carga proporcionan un aumento en la duración de la carrera de filtración (Dibernado, 2009).

En 1986 Wegelin reportó que la eficiencia de un filtro decrece a medida que aumenta la acumulación de sólidos en el filtro. La eficiencia del filtro se reduce en un factor de 10 o más cuando se excedía una acumulación de lodos de 10 gL^{-1} , lo cual quiere decir que el área correspondiente a un filtro de 0.5 m de longitud relativamente limpio, presenta la

misma eficiencia de un filtro de 5 m de longitud con acumulación de lodos (Ochoa & Galvis, 1996).

En investigaciones con FGAS ubicados en Shalford, Inglaterra, se reportó eficiencias de remoción variaron entre 60-75% para turbiedad y sólidos suspendidos de 86% cuando se presentaron picos y del 81% para coliformes fecales (Clarke, 1996). Esos resultados correspondió a un montaje de 3 unidades con 0.5 m de grava para tamaño de grava de 40, 20 y 10 mm respectivamente, con v_f de 0.6 mh^{-1} y un rango de turbiedad de entrada entre 10 y 98 UNT y coliformes fecales de 976 UFC/100 mL con picos de 12000 UFC/100 mL.

Tabla 3. Resumen de índices utilizados para análisis de la curva de trazadores

Índice	Definición	Ecuación
d	Medidas de dispersión en el reactor. Para un RFP ideal, $d = 0$. Para un RFCM ideal, $d = \infty$	$-\frac{\partial C}{\partial \left(\frac{z}{L}\right)} + \left(\frac{E}{vL}\right) \frac{\partial^2 C}{\partial \left(\frac{z}{L}\right)^2} + \tau \tau = \frac{\partial C}{\partial \left(\frac{t}{\tau}\right)} \quad \text{Ec. 1}$ L = longitud del reactor, m v = velocidad media del fluido, ms^{-1} τ = tiempo de retención hidráulica, s
Pe	Para un RFP, $Pe = \infty$. Para un RFCM, $Pe = 0$. Especificar Pe permite especificar todo el DTR y es la relación entre el transporte de masa por advección y el transporte por dispersión.	$Pe = vL/E \quad \text{Ec. 2}$ vL = tasa de transporte por advección E = tasa de transporte por la dispersión
n	n se obtiene al ajustar el modelo de reactores en serie a un reactor existente, para ello se realiza el ensayo de trazador con inyección continua para obtener la distribución de tiempo de salida. Los datos del trazador se normalizan para estimar la varianza y el error cuadrático.	$E(\theta)n = n(n\theta)^{n-1} / (n-1)! e^{-n\theta} \quad \text{Ec. 3}$ $E(\theta)n$ = distribución de edad de salida para n reactores en serie θ = tiempo de permanencia relativo = t / t', $\sigma^2_{\theta} = 1/n-1 \quad \text{Ec. 4}$

El comportamiento hidráulico y la eficiencia de tratamiento en un sistema de filtración pueden correlacionarse, para ello es necesario identificar las expresiones cinéticas apropiadas, en este caso utilizando el modelo de reactores en serie se puede identificar una expresión que permita relacionar tales comportamientos. La eficiencia de tratamiento en

función del comportamiento hidráulico del reactor se puede analizar mediante las Ec.4, Ec. 5 y Ec.6 (Crittenden, 2012).

$$\left(\frac{1}{Pe}\right) \frac{d^2C}{dz^2} - \frac{dC}{dz} - k\tau C^m \quad \text{Ec. 5}$$

Donde:

Pe = número de Peclet, adimensional

C = concentración del efluente, mg.L^{-1}

z = longitud adimensional = $z.L^{-1}$

L = longitud del reactor, m

k = constante de reacción, s^{-1}

τ = tiempo de retención hidráulica, s

m =orden de reacción

Basado en la Ec.5 para el modelo de orden 1 se obtiene la Ec.6 que permite relacionar la eficiencia con el comportamiento hidráulico analizando los resultados de la prueba de trazadores

$$\left(\frac{C}{C_0}\right) = \frac{1}{(1+k\tau/n)^n} \quad \text{Ec. 6}$$

Dónde:

C_0 = Concentración Inicial, mg.L^{-1}

n =número de tanques en serie

La Ec. 6 permite controlar el producto $k\tau$ ajustando el tiempo de retención hidráulica τ . Pe también puede ser controlado mejorando el funcionamiento hidráulico para obtener un n mayor.

5 METODOLOGÍA

El estudio se llevó a cabo en la estación de investigación y transferencia de tecnología del instituto Cinara ubicada en predios de la –PTAP de Puerto Mallarino, Cali, en la FGAC. Se evaluó por un período de tres meses utilizando agua cruda procedente del río Cauca.



Figura 2. Unidad de filtración –FGAC

5.1 Descripción de unidad de estudio FGAC

La unidad FGAC tiene las características que se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Características de la unidad de experimentación FGAC

Característica	Unidad	Valores experimentales
Velocidad de filtración	(mh ⁻¹)	0.5 - 0.75 - 1.0
Perdida de carga máxima, Galvis (1999)	(cm)	15
Diámetro de filtro	m	1.94
Área de filtro	m ²	2.956
H ₁	(m)	0.25
H ₂	(m)	0.25
H ₃	(m)	0.25
H ₄	(m)	0.25
Lámina de agua	m	0.17

5.2 Procedimiento para la toma de datos

Para revisar la operación de las capas de la unidad FGAC se tuvieron en cuenta el control de la v_f con la regla de aforo, el caudal de operación y la medición de pérdida de carga, este último parámetro para hacer las rutinas de mantenimiento. Existía en la canaleta del FGDi una regla de aforo, por lo cual se realizó con un balde, cronómetro y una probeta graduada las mediciones de caudal para cada una de las alturas definidas previamente hasta tener por completo la compuerta abierta para la máxima capacidad del canal. Para determinar la v_f se midió el área del filtro y se asoció a cada caudal registrado en la regla de aforo. Esta medición correspondió a vertedero triangular. El cálculo de v_f se hizo con la Ec. 7.

$$v_f = Q / \pi r^2 \quad \text{Ec. 7}$$

Donde:

V_f = velocidad de filtración mh⁻¹

Q = Caudal m³h⁻¹

A_f = Área de filtración m² (πr^2)

Antes de iniciar la toma de datos dentro del estudio se acondicionaron las unidades para su uso y se realizó la limpieza en las unidades a utilizar, se identificaron los equipos de medición de acuerdo a los parámetros a hacer seguimiento y se calibraron para disminuir los posibles errores por medición. Se adaptaron mangueras para lectura de turbiedad y muestreo de agua entre las capas a analizar, así mismo se cambiaron los piezómetros del tablero con su respectiva regla para medición.

5.3 Ensayo de trazador

El ensayo de trazador se efectuó al inicio de cada carrera de filtración. Primero se controlaron las condiciones de caudal y velocidad, se realizó una medición de turbiedad preliminar para comprobar que el agua cruda no presentara fluctuaciones altas.

Para este ensayo se aplicó la técnica de estímulo – respuesta, la inyección del trazador es el estímulo y la respuesta es la concentración de trazador medida en el flujo de salida, usando cloruro de sodio como trazador con pureza del 99% y concentración de 100 mgL^{-1} , menor al 10% (peso/volumen). La cantidad de trazador a ser aplicado se determinó a través de la Ec. 8

$$P = \frac{Q \cdot K \cdot Co}{I} \quad \text{Ec. 8}$$

Donde:

P = peso del trazador por añadir al reactor, kg

Q = Caudal, $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$

K = constante de corrección.

Co = concentración, $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Se calculó el tiempo teórico de retención (t_o) por medio de la Ec. 9 y se determinó la cantidad de sal y el volumen de agua para preparar la salmuera, para obtener la concentración anteriormente mencionada y sea suficiente para dosificar al menos 3 veces el tiempo teórico.

$$t_o = V/Q \quad \text{Ec. 9}$$

Donde:

V = volumen útil del filtro (teniendo en cuenta la porosidad del medio filtrante), m^3

Q = caudal del filtro, mh^{-1}

5.3.1 Procedimiento para el ensayo de trazador

1. Se calibró una bomba peristáltica para garantizar una dosificación controlada de la sal según cada tiempo teórico de retención hidráulico.
2. Se calculó y midió el volumen de solución madre de cloruro de sodio necesario para producir la concentración en el reactor de acuerdo a los cálculos revisados con las ecuaciones mencionadas.
3. El trazador se dosificó en forma continua inyectado con bomba peristáltica con caudal $115 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$.
4. A partir de la primera toma de la muestra se inició el conteo del tiempo al tomar una muestra del efluente en el tiempo 0, se chequeó la conductividad con Δt previamente calculado (varió según la prueba asociada a cada longitud de lecho) y se valoró indirectamente en la salida y en los puntos muestreo del filtro (Figura 3) a través de mediciones de conductividad eléctrica utilizando un medidor multiparámetro portátil de pH, conductividad HQ30d tipo HACH.
5. Cuando el punto máximo de concentración se identificó en la lectura se detuvo la inyección de trazador, la lectura se continuó hasta alcanzar el valor inicial de conductividad del agua cruda (se estimó la salida del 95% del trazador para detener las mediciones).

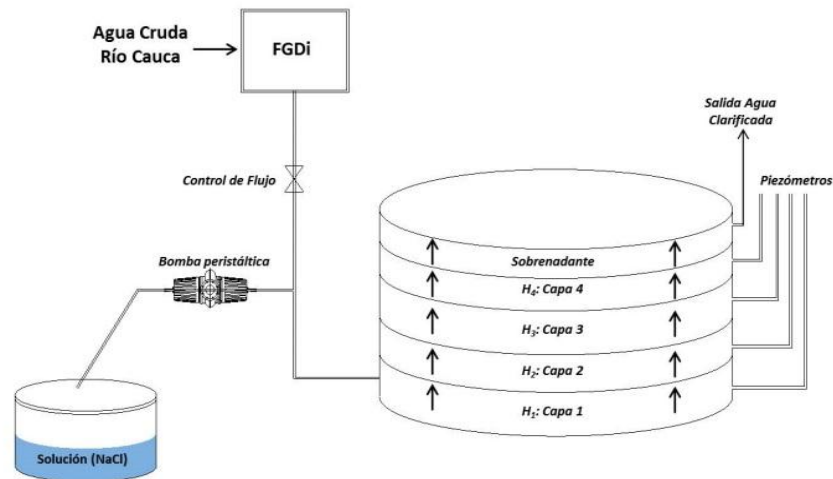


Figura 3. Esquema Ensayo de Trazador

Los resultados de este ensayo de trazador para cada velocidad de filtración se encuentran en el Anexo B.

5.4 Aforo, lectura de pérdida de carga y turbiedad

Para revisar la operación del FGD_i y la unidad de experimentación FGAC se tuvo en cuenta el control de la v_f y la medición de pérdida de carga, utilizada para orientar cambios de calidad de agua cruda en la entrada al sistema. Las v_f se definieron por valores recomendados en estudios en la misma unidad de experimentación y a escala real (Sánchez 2016). En el vertedero triangular posterior al FGD_i y previo al FGAC, existía una regla de aforo ya instalada, sin embargo el chequeo se realizaba con un recipiente plástico (balde), cronómetro y una probeta graduada de 1 L; se hicieron mediciones de caudal para cada una de las velocidades de filtración definidas previamente.

El control se hizo al inicio y durante la carrera de filtración con frecuencia de 1 hora entre toma de datos, debido a cambios de calidad en el afluente. Para determinar el caudal (Q), se midió el área del filtro y se asoció a cada v_f definida. Esta medición correspondió a vertedero triangular.

La lectura del parámetro de turbiedad se realizó durante la operación de cada carrera de filtración con una frecuencia promedio de cada hora durante 3-6 h diarias, en algunos casos por lluvia moderada se hacía lectura de turbiedad en la entrada de la unidad experimental FGAC entre la hora de no medición para evitar picos de turbiedad que dificultara el ensayo o alterara los datos ya condensados. La medición de este parámetro se realizó con el turbidímetro portátil - 2100Q – HACH.

5.5 Caracterización de los medios filtrantes

5.5.1 Prueba de granulometría

En la prueba de granulometría se realizó el [análisis](#) granulométrico mecánico adoptado para partículas con tamaño mayor a 0,074 mm. (74 micrones) mediante mallas de abertura y numeración (Tamices). De acuerdo a la Norma Icontec NTC 1527 — Suelos. Ensayo para determinar la

granulometría por tamizado, utilizada en el laboratorio Ingeniería de Suelos y Pavimentos de la Escuela de Ingeniería Civil y Geomática- Universidad del Valle. tomó una muestra por cada capa de grava, la cual se llevó al horno donde se secó durante 12 horas a 100 °C y todos los grumos se disgregaron en partículas pequeñas. Una vez seca y fría se mezcló varias veces y se sacó una submuestra de 2,000 g la cual se llevó a un vibrador de mallas durante 5 minutos en una serie de tamices con tamaño de abertura entre 2 y 37.5 mm. Después que la prueba de vibración concluyó, se determinó la masa de los granos retenidos en cada malla, expresada generalmente como porcentaje del peso total de la muestra (Domínguez et al., 2013) y se procedió a realizar la curva granulométrica respectiva. Anexo I

Tabla 5. Granulometría de los lechos del FGAC

Tamaño de Grava (mm)	Tamaño de Grava (in)	Fracción predominante (mm)	%
22-24	3/4" - 1"	19,05	92,89
12.7-19.05	1/2" - 3/4"	12,7	94,75
9.53-6.35	1/4" - 1/2"	6,35	93,26
6.35-4.75	1/8" - 1/4"	3,17	29,9

5.5.2 Porosidad de la grava

La porosidad se define como la razón del volumen representado por los poros y el volumen total del lecho filtrante, afectada por la geometría y distribución del tamaño de los granos, la disposición espacial, la sobrecarga de presión y la esfericidad del grano, Escobar (2000). La porosidad se expresa en porcentaje. A las muestras de grava tomadas en cada capa se les calculó la porosidad con base en lo reportado en Ives (1990). Inicialmente se calculó la densidad del medio filtrante con base en los pasos especificados en la Tabla 6, presentada a continuación.

Tabla 6. Pasos para el cálculo de densidad del medio filtrante

PROCEDIMIENTO		
A	Pesar una botella de un volumen determinado vacía	(g)
B	Llenar la botella con agua y pesarla	(g)
C	Pesar la botella + muestra seca	(g)
D	Pesar la botella con muestra seca y con volumen de agua	(g)
E	calcular el volumen de la botella (B-A)	(cm ³)
F	Calcular el peso de la muestra (C-A)	(g)
G	Calcular el volumen de agua con la muestra (C-A)	(cm ³)
H	Calcular el volumen ocupado por la muestra (E-G)	(cm ³)
I	calcular la densidad del material = masa/ volumen (F/H)	(g/cm ³)

Adaptado de Ives (1990)

Después de obtenida la densidad se procedió a calcular la porosidad mediante la Ec. 10.

$$\varepsilon = 1 - \frac{M}{Po \cdot V} \quad \text{Ec. 10}$$

Dónde:

ε = Porosidad

M = Masa de la muestra del medio filtrante (g)

Po = Densidad del medio filtrante (gcm⁻²)

V =Volumen aparente del medio filtrante en la botella (cm³)

5.6 Eficiencias de Tratamiento

El filtro trabajó con las v_f seleccionadas. En cada velocidad se analizó la eficiencia de remoción de turbiedad y sólidos suspendidos totales (SST). Este último parámetro se analizó a partir de la curva de correlación calculada con los valores de turbiedad medidos in situ utilizando el método estándar de laboratorio para obtener resultados confiables de SST (Torres et al., 2013)

5.6.1 Parámetros y Frecuencias

En la Tabla 7 se presentan los parámetros medidos, la frecuencia de medición de los parámetros de seguimiento y la técnica usada en los laboratorios del Instituto Cinara o en campo, según lo establecido en los Métodos Estándar para Análisis de Agua (APHA, AWWA, WPCF, 2005).

Tabla 7. Frecuencia de medición de parámetros

N°	Parámetro	Punto de control	Frecuencia	Técnica	Unidades a reportar
Calidad de agua					
1	Turbiedad	Entrada y salida de cada capa y filtro	4 veces/ día	Nefelométrica	UNT
2	Sólidos Suspendidos Totales	Entrada y salida de cada capa y filtro	4 veces/ día	Curva de correlación	mg.L ⁻¹
2	pH	Entrada y salida del filtro	4 veces/ día	Electromagnética	unidades
3	Velocidad de filtración	Canaleta de entrada FGD _i	3 veces/ día	Medición directa con regla de aforo - aforo	mh ⁻¹
4	Pérdida de carga	Caja piezómetros	2 veces/ día	Medición directa con regla	cm
5	Prueba de trazadores	Compartimiento principal	1 vez/carrera filtración	Electrolítica	μs.cm ⁻¹

5.6.2 Diseño de formatos para recopilación de información

Se elaboró un formato para hacer seguimiento diario de pérdida de carga, v_f , medición de turbiedad y caudal de operación. Otro formato para la prueba de trazador y temperatura. El formato se presenta en Anexo A.

6 ANÁLISIS DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para contribuir al entendimiento del proceso de filtración en grava de flujo ascendente en capas, el comportamiento hidráulico de la unidad piloto fue analizado bajo la influencia de tres v_f (0.5, 0.75 y 1.0 mh^{-1}), para responder a los objetivos planteados y de acuerdo con la metodología, los resultados se organizaron teniendo en cuenta el comportamiento hidráulico del FGAC y la eficiencia.

6.1 Caracterización de los medios filtrantes

Para verificar el diámetro de cada capa del medio filtrante se realizó la caracterización del tamaño de las gravas, pues son fundamentales en el proceso de filtración y su elección es una de las consideraciones más importantes para garantizar la remoción y revisar el comportamiento hidráulico en la unidad (Galvis *et al.*, 1999).

Para definir el tamaño de gravas en cada capa de la unidad filtrante, se clasificaron, midieron y compararon con la información de pruebas de granulometría. Los resultados son presentados en la Tabla 8, donde los tamaños de las gravas en cada capa del filtro y profundidades son comparados con los tamaños recomendados en diseño.

Tabla 8. Caracterización de grava

Capa	Porosidad (%)	Tamaño de Grava (mm)	Diseño recomendado (Galvis <i>et al.</i> , 1999)	Profundidad (m)	Profundidad recomendada (Galvis <i>et al.</i> , 1999)
1	34	22-24	19-25	0.91	0.9 -1.2
2	39	12.7-19.05	13-19		
3	45	6.35-9.53	6-13		
4	52	4.75-6.35	3-6		

Según las recomendaciones para lecho filtrante presentadas en Galvis *et al.* (1999), se pudo observar que para este estudio la unidad piloto se encuentra dentro del rango recomendado en cada capa y profundidad, donde se utilizaron cuatro (4) capas de grava para determinar la eficiencia de tratamiento en cuanto a remoción de sólidos. Así mismo, la porosidad del medio filtrante, se determinó para encontrar el volumen útil en cada capa y de la unidad para la prueba de trazadores, Tabla 8.

A medida que aumenta el tamaño de la grava, según Ives (1990), debe disminuir la porosidad, esta tendencia se apreció en el lecho de la unidad de FGAC. Cuando las gravas son de menor tamaño, tienen la capacidad de almacenar mayor volumen de agua en los poros..

En la Tabla 8 se presentan las características del volumen de agua y grava de la unidad FGAC acorde a la altura del material filtrante por cada capa de grava. Para hallar el volumen útil se considera la porosidad del medio filtrante. El tiempo teórico de retención en el filtro se obtuvo a partir de la Ec. 10.

Tabla 9. Volumen de agua y grava en el FGAC

Capa de estudio mm	Altura de medio filtrante (m)	Volumen de grava (m³)	Volumen de agua (m³)	Volumen total (m³)
22-24	0.25	0.25	0.48	0.731
12.7-19.05	0.25	0.28	0.45	0.731
9.53-6.35	0.25	0.33	0.40	0.731
6.35-4.75	0.16	0.24	0.22	0.468
Longitud total de lecho	0.91	1.10	1.56	2.62

6.2 Análisis del ensayo de trazador capa por capa y longitud total de lecho

Para el análisis de la curva de tendencia del trazador se presentan los resultados obtenidos para cada velocidad de filtración. El análisis se hizo en cada capa de lecho filtrante para determinar el comportamiento hidráulico a lo largo del material filtrante.

6.2.1.1 Velocidades de filtración 0.5 mh^{-1} , 0.75 mh^{-1} , 1.0 mh^{-1} ,

Para el análisis de la curva de tendencia, se observa en la Figura 4 la curva de concentración de trazador vs tiempo obtenido en el estudio hidrodinámico para cada tamaño de grava y la longitud total del lecho.

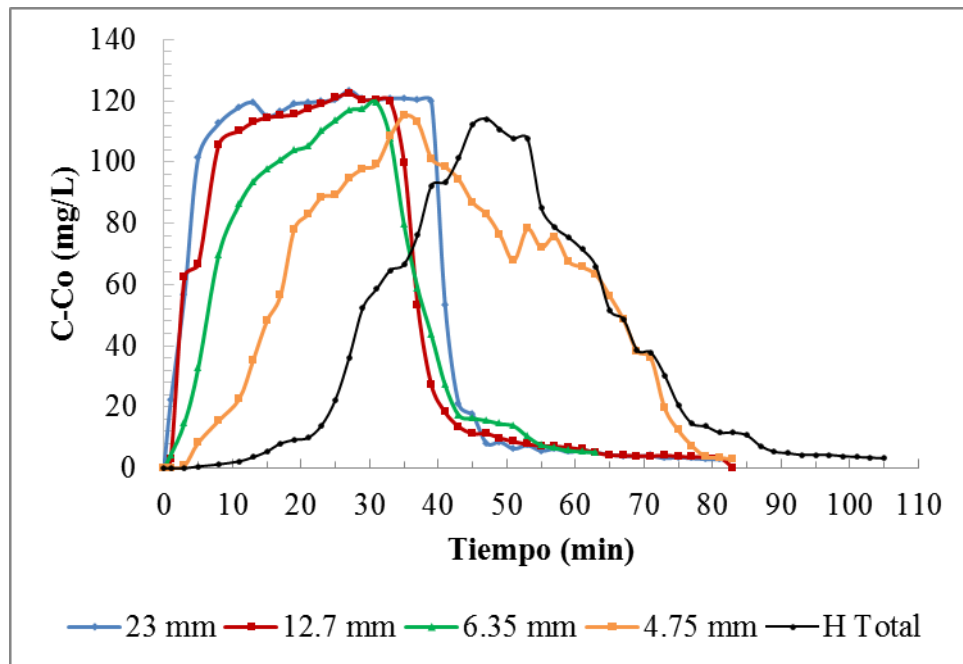


Figura 4. Comportamiento trazador en la longitud total de lecho y por cada tamaño de grava capa por capa $v_f 0.5 \text{ mh}^{-1}$.

Para el análisis de la curva de tendencia, se utilizaron los parámetros resumidos en la Tabla 9.

Tabla 10. Parámetros utilizados en análisis de la curva de tendencia

Relación	Significado
t_p/t_0	$t_p/t_0 \approx 0$ Predomina flujo mezclado $t_p/t_0 \approx 1$ y $t_i/t_0 > 0.5$ Predomina flujo pistón
t_i/t_0	$t_i/t_0 = 0$ Flujo mezcla completa $t_i/t_0 = 1$ Flujo pistón $t_i/t_0 < 0.3$ Cortos circuitos
t_b/t_0	$t_b/t_0 \approx 2.3$ Flujo mezcla completa
t_m/t_0	$t_m/t_0 < 1$ Cortos circuitos y/o zonas muertas
	$t_m/t_0 > 1$ Acumulación indeseada de trazador
e	$e = 0$ Flujo Pistón $e > 2.3$ Flujo mezclado ideal

adaptado (Vargas de Cánepa, 1992).

Dónde:

C_p	Concentración máxima a la salida
t_p	Tiempo transcurrido para alcanzar la máxima concentración del trazador
t_i	Tiempo desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente
t_c	Tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/2$
t_b	Tiempo en que la concentración es mayor que $C_p/10$
t_m	Tiempo correspondiente a la salida del 50% de la cantidad de trazador inyectado
e	Excentricidad

En la Tabla 10 se presentan los resultados para las relaciones en la carrera de filtración de 0.5 mh^{-1}

Tabla 11. Resultados v_f (0.5 mh^{-1})

Tamaño de Grava (mm)	t_p/t_0	t_i/t_0	t_b/t_0	t_m/t_0	e
22-24	1.36	0.05	0.40	1.16	0.10
12.7-19.05	1.47	0.05	0.92	1.20	0.10
9.53-6.35	2.76	0.06	0.66	1.33	0.63
6.35-4.75	3.79	0.54	2.06	4.12	0.00
Longitud total de lecho	0.56	0.3	0.87	1.56	0.10

Se observa para la grava de 22-24 mm que el tiempo que transcurre desde la inyección del trazador hasta que aparece en el efluente corresponde a $t_i = 1$ min. De acuerdo con Hirsch (1969) citado por Galvis (1984), la fracción de flujo a pistón puede considerarse hasta el primer punto de inflexión de la curva donde cambia de concavidad, $t = 8$ min. Entre el punto anterior y el punto de inflexión en la rama descendente de la curva, que corresponde a $t = 39$ min, el flujo es considerado dual (pistón y mezclado) y a partir de este tiempo el flujo predominante es mezclado entre 39 – 80 min. El valor de 1.36 para la relación t_p / t_o y la tendencia a cero (0.05) de la relación t_i / t_o evidenció el predominio de flujo mezclado. Estos valores, además de mostrar la tendencia de flujo de mezcla completa, también indicaron la presencia de procesos de difusión debidos a corrientes de inercia (turbulencia) y recirculaciones en el reactor. La relación t_i / t_o menor a 0.3 y el valor de 1.16 para la relación t_m / t_o , mayor a la unidad indicó la presencia de acumulación indeseada de trazador en este tamaño de grava.

Para la curva de tendencia en la capa 1, con tamaño de grava entre 22-24 mm, no se observaron picos de concentración del trazador antes del valor máximo C_p , no indica la existencia de corto circuitos. Sin embargo, al salir el trazador de manera lenta, generó una forma alargada al final de la curva, desplazando el centroide del área y aumentando el valor del t_m , puede ser indicio de retención del trazador en espacios muertos (definir espacio o zona muerta), mientras la excentricidad, $e = 0.1$ de la curva, que está en función de la recirculación del flujo en el interior del reactor; no confirma la presencia y predominio de flujo pistón a pesar de tener un valor cercano a 0.

Para la curva de tendencia correspondiente a la capa 2, tamaño de grava entre 12.7–19.05 mm, el trazador apareció en $t_i = 1$ minuto. Se tienen las mismas consideraciones que en la primera capa, es así como la fracción de flujo a pistón llega hasta $t_{10} = 17$ min. Entre el punto anterior (t_{10}) y el punto de inflexión que corresponde a $t_{90} = 37$ min, el flujo es considerado mixto y a partir de este tiempo el flujo predominante es mezclado entre 37 – 85 min. Para la relación t_p / t_o con valor de 1.47 y t_i / t_o de 0.05 se evidenció el predominio de flujo mezclado y presencia de cortos circuitos. Así mismo, la relación t_m / t_o equivalente a

1.20 indica la presencia de trazador acumulado, por ser esta mayor a 1. La relación t_i/t_o confirma la presencia de zonas muertas e implica que la curva de distribución del tiempo de residencia muestre una cola prolongada y por lo tanto el tiempo se desplazará en el eje del mismo, el trazador atrapado en la zona muerta presenta mayor tiempo de residencia (Sánchez, 2016) mientras la excentricidad de la curva $e = 0.10$, nuevamente confirma que no hay presencia de flujo a pistón a pesar de tener un valor cercano a 0.

El comportamiento del trazador en la capa 3, tamaño de grava entre 6.35 -9.53 mm muestra al trazador aparecer a partir del minuto 3. La fracción de flujo pistón puede considerarse hasta el $t = 10$, a partir de este punto hasta $t = 37$ min. El flujo es dual y a partir de este tiempo el flujo mezclado prevalece entre 37 – 63 min. El valor de 2.76 para la relación t_p/t_o y la tendencia a cero de la relación t_i/t_o , evidenció el predominio de flujo mezclado. El valor de la relación $t_i/t_o = 0.06$ menor a 0.3 indica paso directo del trazador y el valor de la relación t_m/t_o 1.33 mayor a la unidad mostraron la presencia de zonas donde el trazador ha quedado retenido -zonas muertas-, la excentricidad de la curva, $e = 0.63$ 0 confirma la no presencia de flujo a pistón.

Para la capa 4 con grava de tamaño 4.75- 6.35 mm, el tiempo que transcurre desde la inyección del trazador hasta que aparece en el efluente corresponde a $t_i = 5.0$ min. Realizando el mismo análisis en las capas anteriores, la fracción de flujo a pistón puede considerarse hasta el primer punto de inflexión de la curva donde cambia de concavidad $t = 19$ min. Entre el punto anterior y el punto de inflexión en la rama descendente de la curva, que corresponde a $t = 63$ min., el flujo es considerado dual (pistón y mezclado) y a partir de este tiempo el flujo representativo es mezclado (entre 63 – 85 min.). Teniendo en cuenta los valores de las relaciones t_p/t_o (3.79) y t_i/t_o (0.54) el comportamiento predominante debe considerarse de flujo mezclado, con la relación t_m/t_o (4.12) mayor a 1, indicando la acumulación de trazador. Por lo anterior se realiza el cálculo de la excentricidad de la curva que está en función de la recirculación del flujo en el interior del reactor, arrojando como resultado ($e = 0$). Esto indica que el flujo a pistón es dominante; sin embargo, esta

consideración no es coherente con los valores de las relaciones, por lo cual este método por sí solo no es concluyente sobre el comportamiento hidráulico de reactores.

Como se analizó el comportamiento hidráulico de la unidad por cada tamaño de grava capa por capa, también se observó el comportamiento en la longitud total del lecho, es así como en la curva de tendencia del trazador para totalidad del lecho, el tiempo transcurrido desde la inyección del mismo en la entrada de la capa 1 hasta su aparición en el efluente corresponde a $t_i = 8$ min. La fracción de flujo pistón se consideró hasta $t = 33$ min. A partir de este punto hasta $t = 53$ el flujo es considerado dual (pistón y mezclado) y a partir de este tiempo el flujo es mezclado entre 53 – 105 min. El valor de 0.56 para la relación t_p / t_o evidenció flujo de mezcla completa, y el valor de 0.30 para t_i / t_o confirma la presencia de este flujo, además de indicar cortos circuitos. t_m / t_o mayor a la unidad indica la existencia de cortos circuitos o espacios muertos de acuerdo a la literatura (Vargas de Cánepa, 1992). En la curva se observó en $t=39$ min un pico de concentración del trazador antes del valor máximo C_p , indicando la existencia de corto circuitos. La salida del trazador se llevó a cabo de manera lenta. El aumento del valor del t_m sugiere que existe acumulación del trazador en espacios muertos, mientras la excentricidad ($e = 0.10$), valor cercano a 0, no confirma la presencia de flujo pistón, valor esperado de acuerdo al comportamiento de capa tras capa.

El análisis de las curvas de tendencia del trazador para la velocidad de 0.5 mh^{-1} , mostró que las cuatro capas (1, 2, 3 y 4) del FGAC presentaron un flujo dual con predominio de mezcla completa, alta presencia de zonas muertas y de cortos circuitos. Cabe resaltar que el análisis por medio de esta metodología se aplicó para las otras dos velocidades en estudio $v_f = 0.75$ y 1.0 mh^{-1} , se obtuvo como resultado flujo dual con predominio de mezcla completa en las cuatro capas. Las figuras y resultados se observan en el Anexo C.

Sin embargo el uso de esta metodología no permite comparar cuantitativamente los resultados; por esta razón, se utilizó un modelo matemático que me permite determinar

porcentualmente las fracciones de flujo en el reactor. Se empleó el modelo matemático simplificado de Wolf Resnick.

6.2.2 Modelo simplificado de Wolf y Resnick.

Mediante el análisis de las curvas de tendencia que arrojó el ensayo del trazador se identificaron los flujos predominantes tanto en cada capa del FGAC como el reactor visto en unidad, sin embargo no se obtuvo un valor indicando la fracción de flujo pistón, flujo completamente mezclado ni de zonas muertas. Es por ello que se presentan los resultados del modelo matemático de Wolf-Resnik para las tres velocidades indicadas, para complementar el estudio hidrodinámico. En la Tabla 12 se presentan los resultados del modelo matemático de Wolf-Resnik para el FGAC.

Tabla 12. Resultados del Modelo Wolf Resnick

Fracción %	22-24 mm			12.7-19.7 mm			9.53-6.35mm			6.35- 4.75mm			Longitud total lecho		
	vf (mh ⁻¹)			vf (mh ⁻¹)			vf (mh ⁻¹)			vf (mh ⁻¹)			vf (mh ⁻¹)		
	0.5	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00	0.50	0.75	1.00
Pistón	30	31	23	29	35	16	47	36	48	31	42	26	<u>50</u>	<u>49</u>	<u>49</u>
Zonas muertas	15	-	-	19	19	-	-	-	-	12	-	14	13	14	14
mezclada	<u>55</u>	<u>69</u>	<u>77</u>	<u>52</u>	<u>46</u>	<u>84</u>	<u>53</u>	<u>64</u>	<u>52</u>	<u>57</u>	<u>58</u>	<u>60</u>	37	37	37

Los resultados evidenciaron que el comportamiento hidrodinámico en las cuatro capas a diferentes vf presenta flujo dual, presentándose mayor porcentaje de flujo mezclado, a diferencia en la longitud total del lecho, pues presentó mayor porcentaje de flujo pistón y así confirmando los resultados obtenidos en el análisis de la curva de tendencia del ensayo del trazador.

Para las tres vf la capa 1, con tamaño de grava entre 22-24 mm, presentó un flujo dual con predominio de mezcla completa entre 55-77%, fracción pistón entre el 23-31% y presencia de zonas muertas en un 15% aproximadamente. La capa 2 con grava entre 12.7 a 19.07 mm

también presentó un flujo dual con predominio de mezcla completa entre 34-84%, una fracción de flujo pistón entre 16-46% con alta presencia de zonas muertas (19%) con respecto a las demás áreas de estudio. Para la capa 3 con grava entre 12.7 a 6.35 mm, el porcentaje de fracción mezclada varió entre 52-64% y el flujo pistón entre 36-48%, a diferencia de las demás capas en esta no se presentaron zonas muertas, para la última capa con tamaño de grava 6.35 a 4.75 mm evidenció flujo dual con mayor porcentaje de mezcla completa, 57-60% frente al flujo pistón de 26-42% y con existencia de zonas muertas 12-14%. El comportamiento hidráulico del reactor, muestra que el flujo predominante es pistón, con un porcentaje que varía entre el 49 y 50%, frente a una fracción mezclada de 37%. Para las tres vf ; las zonas muertas se encuentran entre el 13 y 14%. Este comportamiento es similar al análisis de la curva de tendencia, esto puede atribuirse al efecto de la mayor longitud de lecho.

6.2.3 Índice de Morrill

Para determinar la tendencia del flujo en las capas, se empleó el índice de Morrill, hallando la relación entre el segmento comprendido entre el 10% y el 90% que es el más regular. La Tabla 13 muestra el consolidado de resultados.

Tabla 13. Resultados Índice de Morrill

Capa	22-24 mm			12.7-19.7 mm			9.53-6.35mm			6.35- 4.75mm			L. Total lecho		
vf (mh⁻¹)	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0	0.5	0.75	1.0
T₉₀	39	45	44	37	51	27	39	42	29	63	57	35	17	69	25
T₁₀	8	12	12	17	12	8	11	9	8	19	24	11	9	36	13
IM=T₉₀/T₁₀	4.88	3.75	3.67	2.18	4.25	3.38	3.55	4.67	3.63	3.32	2.38	3.18	1.89	1.92	1.92

El IM para el reactor completo en las tres velocidades fueron los más bajos con respecto a las capas. De acuerdo con la EPA (1986), puede considerarse que un reactor con IM inferior a 2 se comporta con tendencia a flujo pistón; es así, como a través de la longitud total del lecho operado con las tres velocidades diferentes funciona bajo el mismo

comportamiento. A diferencia de la evaluación para cada una de las capas, en la que el valor del índice de Morrill (IM) fue mayor a 2 lo que indica la presencia de flujo mezclado.

6.2.4 Modelo de reactores completamente mezclados en serie

Los resultados obtenidos con el modelo de Wolf Resnick y el IM, ofrecieron una comprensión del comportamiento hidrodinámico del FGAC observado en la longitud total del lecho. Sin embargo, para un mejor entendimiento en cada capa, se aplicó el modelo de reactores completamente mezclados en serie. Los resultados del valor de n para cada capa según la velocidad de filtración y su respectiva correlación se muestran en la

Tabla 14.

Tabla 14. Resultado del modelo de reactores completamente mezclados en serie

V_f	$v_f 0.5 \text{ (mh}^{-1}\text{)}$		$v_f 0.75 \text{ (mh}^{-1}\text{)}$		$v_f 1.0 \text{ (mh}^{-1}\text{)}$	
Tamaño de grava (mm)	(n)	r^2 (%)	(n)	r^2 (%)	(n)	r^2 (%)
22-24	2	80	4	86	3	83
12.7-19.05	4	84	6	81	4	91
9.53-6.35	6	87	6	86	4	87
6.35-4.75	6	90	6	92	4	90
Longitud total lecho	10	96	6	94	4	85

El modelo supone que el flujo interior del reactor tiene una distribución de tiempos de residencia similar, explicable a la de una serie de reactores de mezcla (n reactores) conectados unos con otros, por lo tanto, se espera que al aumentar el número de reactores el sistema se aproxime al comportamiento de flujo a pistón. Sin embargo, para las tres v_f la información indica bajos valores de n con tendencia a flujo mezclado en cada una de las cuatro capas. Este comportamiento se corrobora con los métodos de curva de tendencia, Wolf Resnick e índice de Morrill.

Cabe resaltar que el mejor comportamiento hidráulico para el reactor se obtuvo con la vf de 0.5 mh^{-1} pues arrojó un $n=10$, comparado con un $n=6$ para vf de 0.75 mh^{-1} y un $n=4$ para vf de 1.0 mh^{-1} . Este hecho se debe al régimen hidráulico en las capas y a la dependencia de las condiciones de flujo laminar con vf , pues a mayor velocidad aumenta el número de Reynolds en un medio poroso, indicando la presencia de régimen de transición en la mayoría de las capas. Para el cálculo del número de Reynolds en un medio poroso se utilizó

$$Re = \frac{\rho * vf * k^{1/2}}{\mu}$$

la Ec. 11 propuesta por Dinoy, 1971.

$$Re = \frac{\rho * vf * k^{1/2}}{\mu}$$

Ec. 11

Donde:

ρ = densidad de agua (kg m^{-3})

vf = velocidad de filtración

k = permeabilidad (cm^{-1}).

μ = viscosidad absoluta (N m s^{-2});

Tabla 15 Número de Reynolds (Re) para cada tamaño de grava

Tamaño de grava	$vf \text{ 0.5 (mh}^{-1}\text{)}$	$vf \text{ 0.75 (mh}^{-1}\text{)}$	$vf \text{ 1.0 (mh}^{-1}\text{)}$
(mm)	Número de Reynolds (Re)		
22-24	15.7	23.5	31.4
12.7-19.05	13.7	20.5	27.3
9.53-6.35	11.2	16.8	22.4
6.35-4.75	6.1	9.1	12.1
Longitud total de lecho	11.7	17.5	23.3

Los resultados del cálculo de número de Re para cada tamaño de grava y la longitud total de lecho, indica que las capas trabajan en régimen de transición hidráulica porque los valores de Re estuvieron por encima de 10 en el medio poroso, acorde a lo reportado por Ortega et al, 2011. Solo las capas de grava entre 4.7-6.4 mm presentaron valores de Re por debajo de 10, predominando el flujo laminar en esta capa. Las curvas experimentales junto con las curvas teóricas de los reactores completamente mezclados en serie para cada capa

de acuerdo a las velocidades de filtración estudiadas se encuentran en el Anexo E. **Curvas experimentales y curvas teóricas de los reactores completamente mezclados en serie**

En la Figura 5 se presenta la tendencia del número de reactores en serie para cada espesor de capa de grava y a través de todo el lecho de grava.

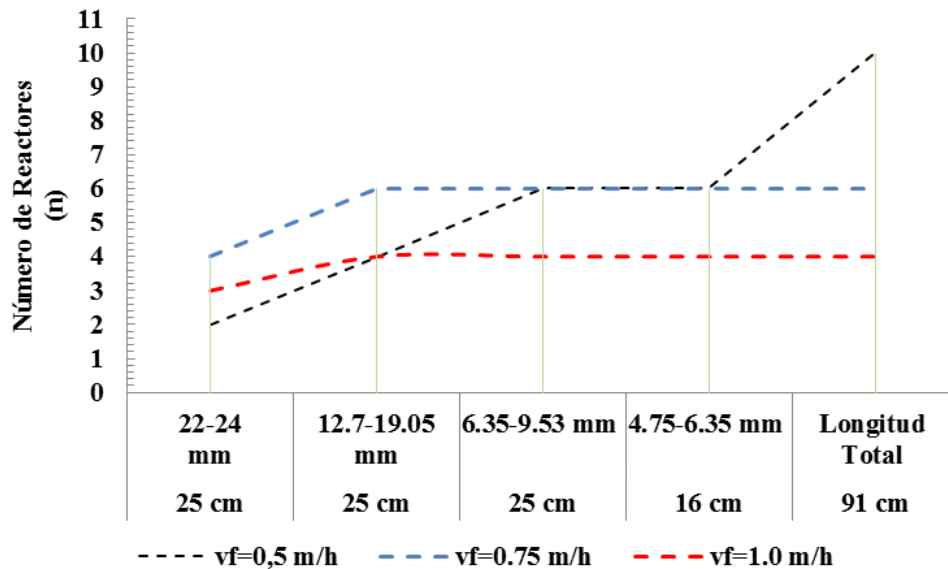


Figura 5. Variación del número de reactores en serie a través del lecho de grava

El número de reactores en serie para v_f de 0.75 m/h y 1.0 m/h no se incrementa al aumentar el número de capas de grava en consecuencia desde el punto de vista de comportamiento hidráulico del reactor para estas v_f la altura del lecho óptimo puede ser de 0.91 m; mientras que, para $v_f = 0.5 \text{ m/h}$ la altura de lecho puede ser mayor para alcanzar $n > 10$ reactores en serie. El valor obtenido para $n = 10$ reactores en serie para $v_f = 0.5 \text{ m/h}$ es igual al reportado por Sánchez (2016).

6.2.5 Número de Peclet

De acuerdo a Crittenden et al. (2012) Pe está relacionado directamente con el número de reactores en serie n . A mayor número de reactores en serie mayor es el valor de Pe ,

indicando tendencia a flujo pistón. Pe se calculó con la Ec. 2 y los resultados se presentan en la Tabla 16.

Tabla 16. Valores para el Número de Peclet y de dispersión

v_f	0.5 (mh ⁻¹)			0.75 (mh ⁻¹)			1.0 (mh ⁻¹)		
Tamaño de grava (mm)	Pe	d	r ² (%)	Pe	d	r ² (%)	Pe	d	r ² (%)
22-24	4	0.25	80	8	0.13	86	6	0.17	85
12.7-19.05	8	0.13	81	12	0.08	83	8	0.13	91
9.53-6.35	13	0.08	87	12	0.08	86	8	0.13	87
6.35-4.75	13	0.08	88	12	0.08	85	8	0.13	90
Longitud total de lecho	20	0.05	98	12	0.08	94	8	0.13	85

En la Tabla 16, se evidencia similares comportamientos a los obtenidos por el modelo de reactores en serie con mayor valor para las capas de grava entre 9.5- 4.7 mm para $v_f=0.5$ mh⁻¹. Para la longitud total de lecho con $v_f = 0.5$ se obtuvo el Pe más alto del ensayo. Los resultados muestran que a mayor tamaño de grava menor es el número de Pe, lo cual indica que mejores condiciones de flujo a pistón se pueden alcanzar con tamaños de grava del orden de 9.5-4.7 mm y con mayor longitud de lecho. Se tuvo en cuenta d calculado por la Ec.1, para comparar con los resultados en el modelo de Wolf Resnick. Para $v_f = 0.5$ mh⁻¹ el valor de d fue el más cercano a 0, indicando la mejor tendencia de flujo a pistón.

6.3 Eficiencia de remoción de sólidos en los FGAC

Las condiciones del agua cruda que más afectan la eficiencia del FGAC son los efluentes con turbiedad y color altos, al igual que la concentración de nutrientes y de sustancias tóxicas (Galvis G., et al, 1999). Las unidades de pretratamiento utilizadas en este estudio FGD_i y FGAC se alimentaron con agua cruda del río Cauca, pues la entrada de agua para la estación de investigación es una derivación de la captación de la PTAP Puerto Mallarino. Para identificar la eficiencia de remoción del proceso con las v_f seleccionadas se evaluó el

parámetro de Sólidos Suspendidos Totales (SST) a partir de la correlación con datos de turbiedad medidos in situ. Los SST se obtuvieron a partir de la siguiente expresión $SST = 0.46 (\text{Turbiedad}) - 2.436$ ($r^2=0.91$). La turbiedad media medida en este estudio se presenta en la Tabla 17. Los valores de seguimiento del parámetro de turbiedad durante el estudio se presentan en el

Vf = 0.75 m.h ⁻¹ Lecturas de piezometro Perdidas de carga (cm)										
Fecha	H1	H2	H3	H4	H5	H1-H2 (capa 1)	H2-H3 (capa 2)	H3-H4 (capa 3)	H4-H5 (capa 4)	R.C
04/10/2013	6,4	5,2	4,1	2,6	2	1,2	1,1	1,5	0,6	4,4
05/10/2013	7,2	5,2	4,3	2,6	2	2	0,9	1,7	0,6	5,2
06/10/2013	7,8	6	4,5	2,7	2,1	1,8	1,5	1,8	0,6	5,7
07/10/2013	8	6,3	4,8	2,7	2,1	1,7	1,5	2,1	0,6	5,9
08/10/2013	8,1	6,4	4,8	2,7	2,2	1,7	1,6	2,1	0,5	5,9
09/10/2013	8,2	6,4	4,9	2,7	2,2	1,8	1,5	2,2	0,5	6
10/10/2013	8,3	6,5	5	2,8	2,2	1,8	1,5	2,2	0,6	6,1
11/10/2013	8,4	6,5	5,2	2,2	1,9	1,9	1,3	3	0,3	6,5
12/10/2013	9,3	6,9	5,2	2,8	2,3	2,4	1,7	2,4	0,5	7
13/10/2013	10,3	7	5,5	2,8	2,3	3,3	1,5	2,7	0,5	8
14/10/2013	11,5	7,5	5,9	3	2,3	4	1,6	2,9	0,7	9,2
15/10/2013	12,8	7,8	6	3	2,3	5	1,8	3	0,7	10,5
16/10/2013	13,5	8	6,2	3	2,3	5,5	1,8	3,2	0,7	11,2
17/10/2013	14	8,2	6,2	3	2,3	5,8	2	3,2	0,7	11,7
18/10/2013	14,6	8,7	6,7	3	2,3	5,9	2	3,7	0,7	12,3
19/10/2013	15	9,4	7,4	3	2,3	5,6	2	4,4	0,7	12,7
20/10/2013	15,2	10,6	8	3	2,3	4,6	2,6	5	0,7	12,9
21/10/2013	16,5	11,3	8,7	3	2,3	5,2	2,6	5,7	0,7	14,2

Vf = 1.0 m.h ⁻¹										
Lecturas de piezometro						Perdidas de carga (cm)				
Fecha	H1	H2	H3	H4	H5	H1-H2 (capa 1)	H2-H3 (capa 2)	H3-H4 (capa 3)	H4-H5 (capa 4)	R.C
16/09/2013	5,5	4,2	3,5	3	2	1,3	0,7	0,5	1	3,5
17/09/2013	9	5,2	3,7	4,2	2,3	3,8	1,5	-0,5	1,9	6,7
18/09/2013	11,2	8,7	7,8	6,6	2,4	2,5	0,9	1,2	4,2	8,8
19/09/2013	13,5	9	8,3	7,5	2,5	4,5	0,7	0,8	5	11
20/09/2013	13,7	10,2	8,5	8	2,5	3,5	1,7	0,5	5,5	11,2
21/09/2013	13,8	10,2	8,5	8	2,5	3,6	1,7	0,5	5,5	11,3
22/09/2013	13,9	10,4	8,6	8	2,5	3,5	1,8	0,6	5,5	11,4
23/09/2013	14,2	10,8	8,7	8	2,5	3,4	2,1	0,7	5,5	11,7
24/09/2013	14,5	11	9,3	8	2,5	3,5	1,7	1,3	5,5	12
25/09/2013	14,5	11,8	9,5	8	2,5	2,7	2,3	1,5	5,5	12
26/09/2013	15,6	13,5	9,6	8	2,5	2,1	3,9	1,6	5,5	13,1
27/09/2013	17,9	14,3	9,8	8,5	2,5	3,6	4,5	1,3	6	15,4
28/09/2013	19,7	14,6	10	8,5	2,5	5,1	4,6	1,5	6	17,2
29/09/2013	20,5	15	10,1	8,4	2,5	5,5	4,9	1,7	5,9	18
30/09/2013	20,6	15,2	10,2	6	2,3	5,4	5	4,2	3,7	18,3
01/10/2013	22,5	15,5	10,3	4	2,3	7	5,2	6,3	1,7	20,2
02/10/2013	25,5	16	10,8	4,8	2,3	9,5	5,2	6	2,5	23,2
03/10/2013	25,6	17,2	10,3	4,3	2,3	8,4	6,9	6	2	23,3
04/10/2013	30	19,8	12,5	5,4	2,3	10,2	7,3	7,1	3,1	27,7

Anexo G.

Tabla 17. Turbiedad media para las tres carreras de filtración

Capa	0.5 (mh⁻¹)		0.75 (mh⁻¹)		1.0 (mh⁻¹)	
Tamaño de grava (mm)	Turbiedad (UNT)		Turbiedad (UNT)		Turbiedad (UNT)	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Entrada	Salida
22-24	24.2	22.9	35.8	30.9	24.5	19.6
12.7-19.05	22.9	20.8	30.9	26.6	19.6	17.5
6.35-9.53	20.8	15	26.6	19.3	17.5	15.4
4.75-6.35	15	12.5	19.3	16.4	15.4	13.5
Longitud total Lecho	12.5	10.3	16.4	12.4	13.5	12

En agua cruda valor máximo admisible <100 UNT (Galvis,1999)

La Tabla 17 indica que turbiedad de salida del FGAC, estuvo entre 10.3-12.4 UNT que pueden facilitar la operación de sistemas de filtración lenta en arena acorde a las recomendaciones de Galvis *et al.* (1999) y Di Bernardo y Sabogal Paz (2008) quienes establecieron un valor alrededor de 10 UNT para los efluentes de los FGAC. El mejor comportamiento de la turbiedad se presentó para $v_f=0.75 \text{ mh}^{-1}$

La Figura 7 presenta la remoción media de SST en cada capa de grava y a través de la longitud total del lecho de grava. El mejor desempeño en remoción de SST para las tres v_f analizadas, se presentó en la capa 3, (grava de 6.35 -9.53 mm) con una eficiencia entre el 28 al 30%, el comportamiento está en armonía con los resultados obtenidos por el método simplificado de Wolf Resnick, que no mostró zonas muertas en esta capa de grava. El desempeño más bajo se obtuvo en la capa 1, rango de tamaño de grava de 22 – 24 mm donde la eficiencia media varió entre el 9 al 16% para las tres v_f , esto indica que a mayor tamaño de grava menor retención de SST.

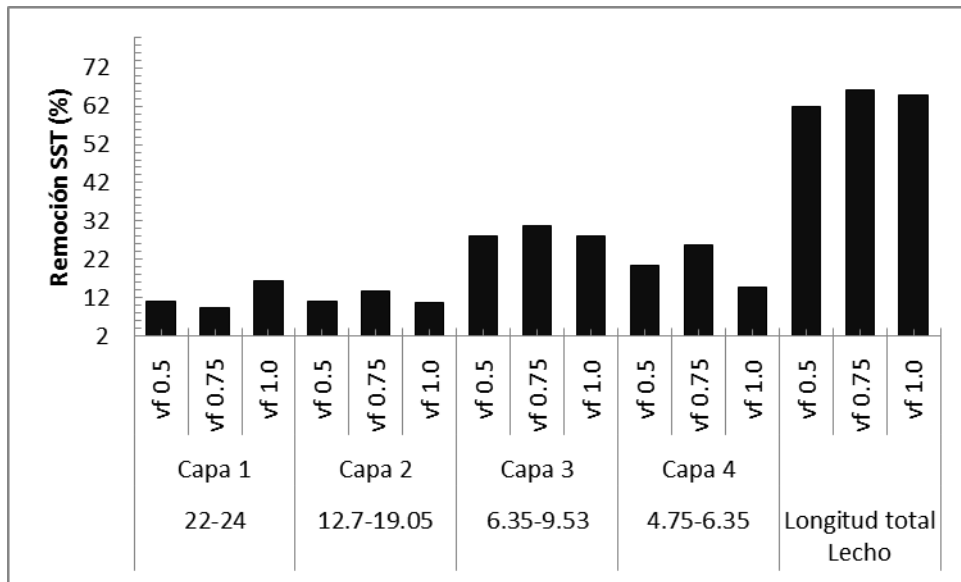


Figura 6. Remoción SST para las tres vf

La eficiencia de remoción de SST en todo el lecho filtrante estuvo en el rango del 62-66% mostrando pocas diferencias entre las diferentes vf . Estos resultados son concordantes con los reportes de Galvis *et al.* (1999) y Sánchez (2016). Las bajas remociones de SST en las capas de grava de mayor tamaño (24 mm-12.7 mm) se puede atribuir al efecto de un mayor tamaño del poro y la presencia de cortos circuitos y zonas muertas en estas capas observadas a través del modelo simplificado de Wolf Resnick.

6.4 Relación entre el número de reactores en serie y la eficiencia

La eficiencia de remoción de SST en función al comportamiento hidráulico se revisó con el modelo de primer orden (Ec. 6). Para este estudio se halló la constante de reacción para cada vf obteniéndose el respectivo k (s^{-1}) (Anexo H).

Se analizó el comportamiento de la eficiencia de acuerdo a las concentraciones SST. Al reemplazar en la Ec. 6 se obtuvieron los modelos para obtener la eficiencia en función del número de reactores en serie para cada vf , los cuales se presentan en la Tabla 18.

Tabla 18. Ecuaciones generales propuestas para predecir eficiencia

$V_f (\text{mh}^{-1})$	k (adimensional)	Ecuación General	
0.5	0,00035	$\left(\frac{C}{C_0}\right) = \frac{1}{(1+0,00035*t/10)^{10}}$	Ec. 12
0.75	0,00038	$\left(\frac{C}{C_0}\right) = \frac{1}{(1+0,00038*t/6)^6}$	Ec. 13
1.0	0,00053	$\left(\frac{C}{C_0}\right) = \frac{1}{(1+0,00053*t/4)^4}$	Ec. 14

La eficiencia promedio para $v_f = 0.5 \text{ mh}^{-1}$ fue de 62% y la eficiencia obtenida por medio de la Ec.12 fue 63.5%, siendo la diferencia entre el valor experimental y el calculado del 4.2%. Realizando este mismo procedimiento y análisis para $v_f = 0.75 \text{ mh}^{-1}$ el valor experimental fue del 67% mientras que el calculado con la Ec. 13 fue del 68%, con una diferencia de 2.13%. Para la $v_f = 1.0 \text{ mh}^{-1}$ el valor fue del 63% y el calculado con la Ec. 14 fue del 67% obteniéndose la mayor diferencia del 9.9%.

6.4.1 Pérdida de carga

Para estimar la pérdida de carga el período de operación para $v_f = 0.5 \text{ mh}^{-1}$ fue de 17 días, $v_f = 0.75 \text{ mh}^{-1}$ fue 19 días y $v_f = 1.0 \text{ mh}^{-1}$ de 18 días, se debe tener en cuenta que la época de lluvia aceleró el tiempo para lograr el máximo nivel de pérdida de carga. En el Anexo F se consigna el seguimiento de pérdida de carga en el FGAC. La Tabla 18 muestra la lectura final de pérdida de carga.

Tabla 19. Pérdida de carga

Pérdida de carga (cm)		Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Unidad
Tamaño de grava (mm)		22-24	12.7 - 19.05	6.35 - 9.53	4.75 - 6.35	Longitud total lecho
$v_f(0.5)$	Lectura Final	6.2	5.6	1.2	0.1	13.1
$v_f(0.75)$	Lectura Final	5.2	2.6	5.7	0.7	14.2
$v_f(1.0)$	Lectura Final	10.2	7.3	7.1	3.1	27.7

La pérdida de carga en el filtro se incrementó proporcionalmente con la velocidad de filtración, pues los valores más altos se ubican en la $v_f = 1.0 \text{ mh}^{-1}$ esto debido a la separación de las partículas en la entrada y en las capas inferiores, generando dispersión de partículas en las mismas. Además, el aumento de la velocidad aumenta el caudal del efluente por tanto las partículas pueden trasladarse con mayor facilidad por turbulencias altas hasta el FGAC alcanzando en menor tiempo el nivel máximo de pérdida de carga con respecto a una velocidad de filtración inferior.

7 CONCLUSIONES

- El comportamiento hidráulico analizado con las $v_f = 0.5-0.75$ y 1.0 mh^{-1} mediante las curvas de tendencia, método simplificado de Wolf Resnick y modelo de reactores completamente mezclados en serie, presentó para cada longitud de lecho con diferentes tamaños de grava flujo dual con predominio de mezcla completa, alta presencia de zonas muertas y de cortos circuitos en el rango de mayor tamaño de grava 24-12.7 mm (capa 1 y 2).
- La capa 4 con tamaño de grava 4.7 – 6.3 mm presentó tendencia a flujo pistón de acuerdo a las relaciones de parámetros de la curva de tendencia.
- La capa 3 con tamaño de grava de 6.3-9.5 mm no presentó zonas muertas para las tres v_f estudiadas.
- El análisis del reactor a través de la longitud total de lecho mostró tendencia de flujo pistón con las tres v_f pero el mejor desempeño se alcanzó con la $v_f = 0.5$ con un número de reactores completamente mezclados en serie de $n = 10$ y un número de Peclet de 20.
- La velocidad de filtración influye considerablemente en el comportamiento hidráulico, pues los resultados evidenciaron mejor desempeño capa a capa y longitud total de lecho cuando se operó con una menor velocidad de filtración; v_f de 0.5 mh^{-1} ; se relacionó este comportamiento a la cercanía al flujo laminar presente de acuerdo al valor de Re obtenido para cada v_f ($Re < 10$).
- La mayor eficiencia de remoción SST para las tres v_f , se evidenció en la capa 3, tamaño de grava entre 6.35-9.53 mm, con un valor medio del 30%.

- La eficiencia de remoción de SST en todo el lecho filtrante estuvo en el rango del 62-66% mostrando pocas diferencias entre las diferentes v_f .
- El desempeño más bajo de remoción de SST se presentó en tamaño de grava de 24-12.7 mm (capa 1 y 2), está relacionado a los problemas de cortos circuitos y zonas muertas evidenciadas en el modelo de Wolf Resnick.
- La eficiencia de remoción de SST en función al comportamiento hidráulico, se revisó con el modelo de primer orden $\left(\frac{C}{C_0}\right) = \frac{1}{(1+k\tau/n)^n}$. Las diferencias entre las eficiencia medidas y las calculadas con el modelo primer orden variaron entre el 2.1% y 9.9% para las tres v_f analizadas.
- El valor máximo de la pérdida de carga se presentó con la velocidad de filtración más alta del estudio, $v_f = 1.0 \text{ mh}^{-1}$.

Recomendación

Para v_f entre 0.7-1.0 mh^{-1} la altura del lecho óptimo puede ser del 0.91 m, porque no se apreció incrementos en el número reactores en serie entre las ultimas capas de grava. Para $v_f = 0.5 \text{ mh}^{-1}$ la altura de lecho puede ser mayor al de este estudio para alcanzar $n > 10$ reactores en serie.

8 BIBLIOGRAFÍA

- Aldana, G. (2004). *Hydraulic behaviour and performance improvement of waste stabilisation ponds (WSPs) using a computational fluid dynamic (CFD) and a physical model*, PhD Thesis, Centre for Environmental Health Engineering. England: University of Surrey.
- APHA, AWWA & WPCF (2005). *Standard Methods for the examination of water and wastewater*. American Public Health Association, Washington, DC, USA
- CINARA, I. (1992). *Filtración lenta en arena tratamiento de agua para comunidades -Planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento*. Cali.
- Clarke, B. L. (1996). *In Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration*. Wiley: Nigel Graham & Robin Collins.
- Crittenden, J. R. (2012). *MWH's Water Treatment: Principles and Design, Third Edition*. New Jersey: John Wiley & Sons.
- Dibernado, L. P. (2009). *"Seleção de tecnologias de tratamento de agua"*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, ABES.
- Domínguez, A. & Sánchez, L.D (2013). *Análisis del crecimiento de algas en un FGAC aplicando simulación computacional*. Cali, Colombia: Universidad del Valle.
- EPA, A. E. ((1986)). *Design Manual, Municipal Wastewater Disinfection*. U.S. Cincinnati: Pub No. EPA 625-1-86-021.
- Escobar, F (2000). *Fundamentos de ingeniería de yacimientos*. Universidad Surcolombiana. Gálvis
- G, Latorre, J., & Visscher, J. (1999). *Filtración en múltiples etapas. Tecnología innovativa para el tratamiento de agua*. Cali: Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico cinara.
- Galvis, G. (2000). *Filtración en múltiples etapas (FiME): tecnología para el tratamiento del agua*. Cali.
- Galvis. (2004). *"La filtración en múltiples etapas en el tratamiento del agua para consumo humano. El caso de Mondomo (Colombia)*. Cali.
- ISO, I. O. (1999). *Determination of turbidity, Standard ISO 7027: Water quality*. Ginebra.
- Ives, K. (1990). *Testing of filter media*. London.
- Maldonado, V. (1992). *Revisión "Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención"*. Lima.

- Ochoa, A. E., & Gálvis, G. (1996). *Comparación de filtración gruesa horizontal y filtración gruesa ascendente en serie*. Universidad del Valle, Cali.
- Ortega, C. A., Garibay, J. M., Barragán, S. Mejías, B. (2011). *Regímenes de flujo en medios porosos*. Colima, México: Facultad de ingeniería mecánica y Eléctrica. Universidad de Colima.
- Pérez C, J., & Gálvis, G. (1990). *Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención*. Cali.
- Posso, D. & Sánchez, L.D. (2013). *Análisis de la operación y mantenimiento de la filtración en gravas de flujo ascendentes a escala real*. Colombia: Universidad del Valle. Cali.
- Sánchez T, A., & Cruz V, C. (2000). *Comparación de dos configuraciones de medio filtrante en clarificadores de filtración gruesa ascendente en capas*. Cali: Universidad del Valle.
- Sánchez L. D. (2016). *Upflow gravel filtration for multiple uses*. Tesis PhD, Países bajos: Universidad Delft.
- Vargas de Cánepa, L. (1992). *Plantas de Tratamiento de Filtros Lentos. Proyecto de Desarrollo Tecnológico de las Instituciones de Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillado. Filtros de arena en acueductos rurales; investigación No. 3*. Lima : CEPIS.
- Visscher, J. (2006). *Facilitating Community Water Supply Treatment*. Países Bajos: Wageningen University.
- Wegelin, M. L. (1997). *La filtración gruesa en el tratamiento de agua de fuentes superficiales*. . Universidad del Valle y Instituto de Investigación y Desarrollo en Abastecimiento de Agua, Saneamiento Ambiental y Conservación del Recurso Hídrico.

ANEXOS

Anexo A. Formatos para recopilación de información

FILTRO DE GRAVA FLUJO ASCENDENTE EN CAPAS									Vf=						
Fecha	pH Ent	Hora Inicio	Pérdida de carga						Turbiedad						
			H1	H2	H3	H4	H5	H6	H1	H2	H3	H4	H5	H6	
Día 1: _____			-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Día 2: _____															
Día 3: _____															
Día 4: _____															
Día 5: _____															
Día 6: _____															
Día 7: _____															
Día 8: _____															

DATOS EXPERIMENTALES														
Equipo utilizado: _____					Fecha: _____			Hora Inicio: _____			Hora Final: _____			
Capa 1			Capa 2			Capa 3			Capa 4			Reactor Completo		
Δt (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	T (°C)	Δt (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	T (°C)	Δt (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	T (°C)	Δt (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	T (°C)	Δt (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	T (°C)
0			0			0			0			0		
1			1			1			1			1		
3			3			3			3			3		
5			5			5			5			5		
7			7			7			7			7		
9			9			9			9			9		
11			11			11			11			11		
13			13			13			13			13		
15			15			15			15			15		
17			17			17			17			17		
19			19			19			19			19		
21			21			21			21			21		
23			23			23			23			23		
25			25			25			25			25		
27			27			27			27			27		
29			29			29			29			29		
31			31			31			31			31		
43			43			43			43			43		

Anexo B. Ensayo de trazador

DATOS EXPERIMENTALES $V_f = 0.5 \text{ m.h}^{-1}$														
Equipo utilizado: <u>HQ30d</u>			Fecha: 26/08/13			Hora Inicio: 9:15 am			Hora Final: 11:05 am					
Capa 1			Capa 2			Capa 3			Capa 4			Reactor completo		
tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l
0	84,40	41,40	0	84,30	41,30	0	84,30	41,34	0	92,60	45,41	0	92,10	45,17
1	129,50	63,50	1	90,20	44,20	1	93,20	45,70	1	92,60	45,41	1	92,10	45,17
3	199,60	97,80	3	211,80	103,80	3	114,50	56,14	3	94,30	46,24	3	92,10	45,17
5	291,30	142,80	5	220,10	107,90	5	151,00	74,03	5	109,60	53,74	5	93,30	45,75
8	314,00	153,90	8	300,00	147,00	8	226,60	111,07	8	124,30	60,94	8	94,70	46,44
11	325,00	159,30	11	309,00	151,40	11	260,10	127,49	11	139,00	68,15	11	92,10	45,17
13	328,00	160,80	13	315,00	154,40	13	275,00	134,79	13	164,30	80,54	13	93,30	45,75
15	319,00	156,30	15	318,00	155,90	15	283,50	138,95	15	190,60	93,43	15	103,20	50,60
17	322,00	157,80	17	319,00	156,30	17	289,70	141,99	17	207,80	101,86	17	96,40	47,27
19	327,00	160,30	19	320,00	156,80	19	296,00	145,08	19	252,00	123,52	19	111,00	54,43
21	328,00	160,80	21	324,00	158,80	21	299,00	146,55	21	261,60	128,22	21	112,40	55,11
23	329,00	161,20	23	326,80	160,20	23	309,00	151,45	23	273,20	133,90	23	120,80	59,23
25	330,00	161,70	25	331,00	162,20	25	316,00	154,88	25	275,00	134,79	25	137,80	67,56
27	336,00	164,70	27	334,00	163,70	27	322,81	158,21	27	285,80	140,08	27	165,90	81,33
29	330,20	161,80	29	329,70	161,60	29	324,00	158,80	29	292,20	143,21	29	199,00	97,55
31	330,00	161,70	31	330,00	161,70	31	328,13	160,82	31	295,00	144,59	31	197,20	96,66
33	331,00	162,20	33	329,00	161,20	33	304,00	149,00	33	313,80	153,80	33	224,00	109,80
35	331,00	162,20	35	288,00	141,20	35	246,50	120,82	35	327,46	160,49	35	228,00	111,76
37	330,00	161,70	37	192,70	94,50	37	204,00	100,00	37	323,00	158,31	37	227,30	111,41
39	329,00	161,20	39	139,70	68,50	39	173,00	84,81	39	299,00	146,55	39	280,60	137,53
41	193,00	94,60	41	121,60	59,60	41	139,68	68,48	41	293,40	143,80	41	282,87	138,64
43	127,00	62,30	43	112,00	54,90	43	119,60	58,64	43	285,00	139,69	43	299,18	146,64
45	120,00	58,80	45	107,40	52,70	45	117,50	57,61	45	269,80	132,24	45	321,00	157,33
47	101,10	49,60	47	107,40	52,70	47	116,00	56,88	47	261,90	128,37	47	325,00	159,29
49	101,90	50,00	49	104,40	51,20	49	113,90	55,85	49	248,10	121,61	49	318,00	155,86

DATOS EXPERIMENTALES $V_f = 0.5 \text{ m.h}^{-1}$														
Equipo utilizado: <u>HQ30d</u>			Fecha: 26/08/13			Hora Inicio: 9:15 am			Hora Final: 11:05 am					
Capa 1			Capa 2			Capa 3			Capa 4			Reactor completo		
tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l
51	97,40	47,80	51	102,00	50,00	51	112,40	55,11	51	231,00	113,23	51	312,00	152,92
53	99,70	48,90	53	100,20	49,10	53	105,33	51,65	53	252,10	123,57	53	312,00	152,92
55	96,00	47,10	55	99,30	48,70	55	99,60	48,84	55	239,70	117,49	55	265,80	130,28
57	97,40	47,80	57	98,90	48,50	57	97,78	47,95	57	246,80	120,97	57	237,90	116,61
59	95,20	46,70	59	98,10	48,10	59	96,00	47,08	59	230,40	112,93	59	252,60	123,81
61	96,40	47,30	61	96,80	47,50	61	95,27	46,72	61	226,60	111,07	61	245,90	120,53
63	94,80	46,50	63	94,60	46,40	63	94,70	46,44	63	221,50	108,57	63	226,60	111,07
65	93,40	45,80	65	93,10	45,70				65	207,30	101,61	65	197,30	96,71
69	92,50	45,40	69	92,70	45,50				67	191,50	93,87	67	191,50	93,87
71	92,40	45,30	71	92,40	45,30				69	170,50	83,58	69	170,80	83,73
73	92,70	45,50	73	92,40	45,30				71	166,10	81,43	71	169,20	82,94
75	91,10	44,70	75	92,70	45,50				73	132,80	65,11	73	154,10	75,55
77	91,70	45,00	77	92,20	45,20				75	117,90	57,81	75	134,14	65,77
79	91,00	44,60	79	91,70	45,00				77	107,37	52,65	77	121,90	59,77
81	90,50	44,40	81	92,00	45,10				79	100,30	49,18	79	120,00	58,84
83	90,30	44,30	83	91,60	44,90				81	99,60	48,84	81	115,90	56,83
85	90,20	44,20	85	91,50	44,90				83	98,50	48,30	83	115,90	56,83
									85			85	114,00	55,90
												87	106,90	52,42
												89	103,16	50,59
												91	102,20	50,11
												93	101,00	49,53
												95	101,10	49,58
												97	101,00	49,53
												99	100,20	49,13
												101	99,60	48,84
												103	99,20	48,64
												105	98,70	48,40

DATOS EXPERIMENTALES $V_f = 0.75 \text{ m.h}^{-1}$														
Equipo utilizado: <u>HQ30d</u>			Fecha: 14/09/13			Hora Inicio: 11:15 am			Hora Final: 13:15 am					
Capa 1			Capa 2			Capa 3			Capa 4			Reactor completo		
tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l	tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l	tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l	tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l	tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l
0	99,50	48,79	0	99,80	48,94	0	103,10	50,56	0	108,20	53,05	0	95,40	46,78
3	122,70	60,16	3	100,40	49,23	3	110,20	54,03	3	109,10	53,50	3	95,85	47,00
6	168,80	82,75	6	104,90	51,44	6	115,90	56,83	6	108,90	53,40	6	96,60	47,37
9	201,50	98,77	9	109,80	53,84	9	123,00	60,31	9	109,20	53,54	9	104,40	51,19
12	256,00	125,48	12	113,10	55,46	12	111,60	54,72	12	110,50	54,18	12	111,70	54,77
15	307,20	150,56	15	116,40	57,07	15	113,00	55,41	15	112,30	55,06	15	119,10	58,40
18	305,20	149,58	18	118,50	58,10	18	114,80	56,29	18	116,60	57,17	18	132,40	64,91
21	297,90	146,01	21	118,20	57,95	21,00	119,10	58,40	21	127,70	62,61	21	146,45	71,80
24	300,10	147,09	24	123,10	60,36	24,00	130,20	63,83	24	132,90	65,16	24	157,20	77,06
27	305,20	149,58	27	123,80	60,70	27	139,00	68,15	27	139,00	68,15	27	197,10	96,62
30	307,80	150,86	30	129,70	63,59	30	159,30	78,09	30	141,50	69,37	30	219,50	107,59
33	308,20	151,05	33	131,40	64,42	33	177,70	87,11	33	151,30	74,17	33	230,10	112,79
36	316,30	155,02	36	132,00	64,72	36	185,60	90,98	36	156,80	76,87	36	239,05	117,17
39	321,70	157,67	39	136,10	66,73	39	201,50	98,77	39	175,20	85,88	39	243,75	119,47
42	320,40	157,03	42	140,00	68,64	42	203,00	99,51	42	183,10	89,76	42	244,85	120,01
45	309,70	151,79	45	143,30	70,25	45	193,20	94,70	45	194,60	95,39	45	251,90	123,47
48	298,80	146,45	48	142,70	69,96	48,00	187,60	91,96	48	202,00	99,02	48	257,80	126,36
51	278,30	136,40	51	138,30	67,80	51,00	177,70	87,11	51	205,90	100,93	51	258,00	126,46
54	267,40	131,06	54	132,80	65,11	54	155,20	76,08	54	207,00	101,47	54	259,00	126,95
57	219,40	107,54	57	129,80	63,64	57,00	138,20	67,75	57	208,30	102,10	57	256,80	125,87

DATOS EXPERIMENTALES $V_f = 0.75 \text{ m.h}^{-1}$														
Equipo utilizado: <u>HQ30d</u>			Fecha: 14/09/13			Hora Inicio: 11:15 am			Hora Final: 13:15 am					
Capa 1			Capa 2			Capa 3			Capa 4			Reactor completo		
tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l	tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l	tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l	tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l	tiempo (min)	Cond ($\mu\text{s/cm}$)	mg/l
60	158,10	77,51	60	128,30	62,90	60	137,60	67,46	60	209,70	102,79	60	254,85	124,91
63	138,40	67,85	63	122,70	60,16	63	128,80	63,15	63	203,00	99,51	63	251,55	123,30
66	130,20	63,83	66	119,80	58,74	66	120,30	58,98	66	201,70	98,87	66	246,60	120,87
69	126,90	62,22	69	118,40	58,05	69	116,30	57,02	69	197,80	96,96	69	220,85	108,25
72	120,20	58,93	72	115,90	56,83	72	112,30	55,06	72	196,20	96,17	72	202,60	99,31
75	118,30	58,00	75	108,30	53,10	75,00	110,70	54,28	75	196,10	96,13	75	184,85	90,61
78	113,10	55,46	78	99,80	48,94	78,00	108,56	53,23	78	195,10	95,64	78	173,80	85,20
81	112,60	55,21	81	98,30	48,20	81	105,30	51,63	81	190,70	93,48	81	170,50	83,58
84	111,30	54,57				84	104,20	51,09	84	185,10	90,74	84	166,10	81,43
87	108,89	53,39							0	175,20	85,88	87	151,50	74,27
90	107,00	52,47							0	152,70	74,86	90	141,60	69,42
93	104,50	51,24							0	135,70	66,53	93	135,10	66,24
96	103,20	50,60							0	135,10	66,24	96	124,20	60,89
99	100,40	49,23							0	126,30	61,92	99	120,40	59,03
102	99,60	48,84							0	117,80	57,76	102	112,80	55,31
105	99,50	48,79							0	115,40	56,58	105	110,80	54,33
									0	113,70	55,75	108	106,40	52,17
									0	112,50	55,16	111	103,10	50,56
									0	109,80	53,84	114	100,30	49,18
												117	99,60	48,84
												120	98,50	48,30

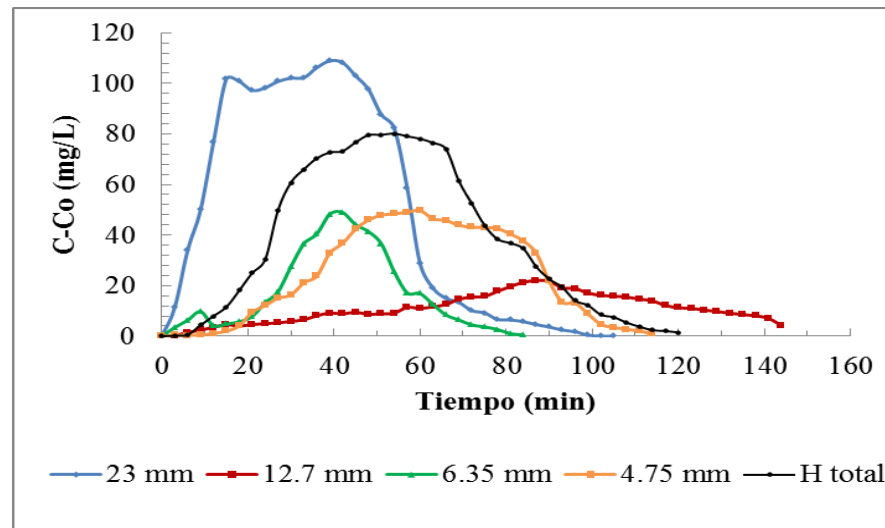
DATOS EXPERIMENTALES Vf = 1.0 m.h ⁻¹														
Equipo utilizado: _HO30d			Fecha: 04/10/13			Hora Inicio: 10:30 am			Hora Final: 12:15 pm					
Capa 1			Capa 2			Capa 3			Capa 4			Reactor completo		
tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l
0	99,50	48,79	0	78,00	38,26	0	97,80	47,96	0	98,20	48,15	0	97,50	47,81
1	109,50	53,69	1	83,50	40,95	2	99,45	48,77	2	99,75	48,91	2	98,60	48,35
3	117,60	57,66	3	88,40	43,35	4	106,30	52,12	4	106,60	52,27	4	99,20	48,64
5	124,10	60,85	5	95,00	46,59	6	117,40	57,56	6	117,70	57,71	6	102,00	50,02
8	136,40	66,87	8	97,40	47,76	8	122,60	60,11	8	122,90	60,26	8	108,20	53,05
11	145,40	71,28	11	101,35	49,70	10,00	128,70	63,10	10	130,25	63,86	10	119,50	58,59
13	145,30	71,23	13	108,56	53,23	12	131,20	64,32	12	146,80	71,97	12	123,30	60,45
15	146,60	71,87	15	113,90	55,85	14	122,40	60,01	14	165,20	80,98	14	130,20	63,83
17	148,50	72,80	17	121,30	59,47	16	146,50	71,82	16	173,10	84,86	16	141,80	69,52
19	152,30	74,66	19	126,40	61,97	18	164,90	80,84	18	184,60	90,49	18	143,10	70,16
21	154,50	75,74	21	130,30	63,88	20	172,80	84,71	20	192,00	94,12	20	146,20	71,67
23	155,30	76,13	23	133,60	65,50	22,00	184,20	90,29	22	194,70	95,44	22	154,70	75,84
25	160,30	78,58	25	135,20	66,28	24	190,13	93,20	24	190,30	93,28	24	157,00	76,97
27	164,30	80,54	27	134,50	65,94	26	195,60	95,88	26	195,90	96,03	26	156,20	76,57
29	165,40	81,08	29	129,30	63,39	28	196,70	96,42	28	198,33	97,22	28	161,10	78,98
31	166,30	81,52	31	128,60	63,05	30	197,70	96,91	30	191,94	94,09	30	170,86	83,76
33	168,20	82,45	33	125,00	61,29	32	198,30	97,20	32	186,20	91,27	32	174,30	85,44
35	159,30	78,09	35	121,20	59,42	34,00	199,40	97,74	34	184,31	90,35	34	180,70	88,58
37	158,70	77,80	37	115,00	56,39	36	192,70	94,46	36	175,10	85,84	36	181,20	88,82
39	159,40	78,14	39	113,10	55,46	38	192,50	94,36	38	165,20	80,98	38	182,80	89,61
41	148,30	72,70	41	112,60	55,21	40	191,80	94,02	40	142,70	69,96	40	184,30	90,34

DATOS EXPERIMENTALES Vf = 1.0 m.h ⁻¹														
Equipo utilizado: _HO30d			Fecha: 04/10/13			Hora Inicio: 10:30 am			Hora Final: 12:15 pm					
Capa 1			Capa 2			Capa 3			Capa 4			Reactor completo		
tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l	tiempo (min)	Cond (µs/cm)	mg/l
43	147,10	72,12	43	111,30	54,57	42	191,50	93,87	42	125,70	61,63	42	185,15	90,76
45	145,40	71,28	45	110,10	53,99	44	187,05	91,69	44	120,70	59,18	44	186,00	91,18
47	144,30	70,74	47	108,70	53,30	46,00	182,10	89,27	46	120,70	59,18	46	184,20	90,29
49	143,60	70,40	49	107,60	52,76	48	184,05	90,22	48	107,80	52,86	48	182,90	89,66
51	130,10	63,79	51	106,60	52,27	50	174,80	85,69	50	103,30	50,65	50	181,00	88,73
53	128,80	63,15	53	104,50	51,24	52	164,90	80,84	52	102,75	50,38	52	175,60	86,08
55	128,10	62,81	55	103,20	50,60	54	142,40	69,81	54	99,80	48,94	54	167,90	82,31
57	127,60	62,56	57	100,40	49,23	56	125,40	61,48				56	158,60	77,75
59	126,50	62,02	59	91,96	45,10	58,00	124,80	61,19				58	152,70	74,86
61	126,20	61,87	61	84,20	41,29	60	116,00	56,88				60	143,90	70,55
63	120,80	59,23	63	82,00	40,22	62	107,50	52,71				62	140,60	68,93
65	116,30	57,02	65	81,00	39,73	64	103,40	50,70				64	138,90	68,10
69	111,50	54,67	67	78,00	38,26	66	102,20	50,11				66	123,90	60,75
71	109,50	53,69				68	99,50	48,79				68	115,20	56,48
73	108,50	53,20										70	111,60	54,72
75	106,30	52,12										72	103,20	50,60
77	105,40	51,68										74	99,60	48,84
79	103,20	50,60												
81	100,60	49,33												
83	100,10	49,09												
85	99,80	48,94												
87	99,70	48,89												

Anexo C. Comportamiento trazador capa a capa y a través de la longitud total

vf (0.75 mh⁻¹)

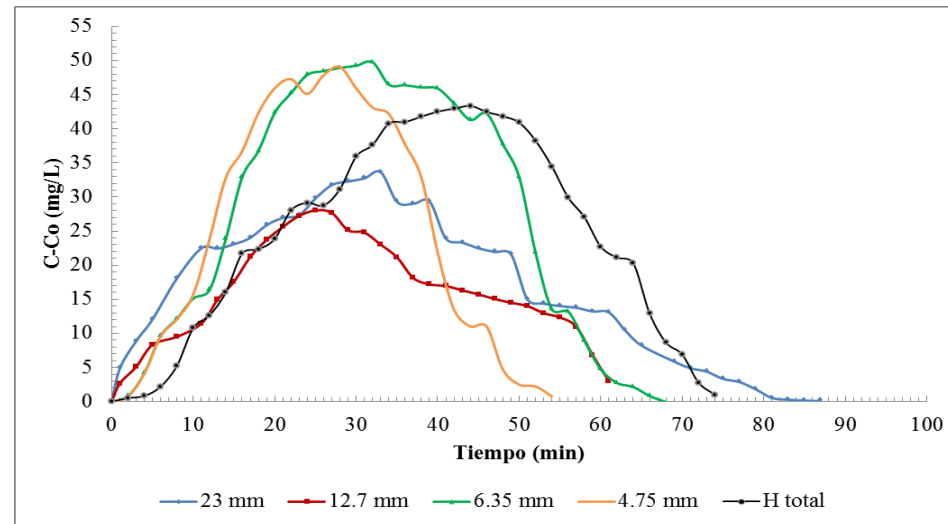
vf (0.75 mh ⁻¹)	t _p / t ₀	t _i / t ₀	t _b / t ₀	t _m / t ₀	e
	1.10	0.08	0.17	0.93	0.085
	1.69	0.05	0.19	0.818	0.72
	1	0.07	0.23	0.52	0.07
	0.97	0.24	0.39	0.58	0.63
	0.56	0.18	0.19	0.30	0.18



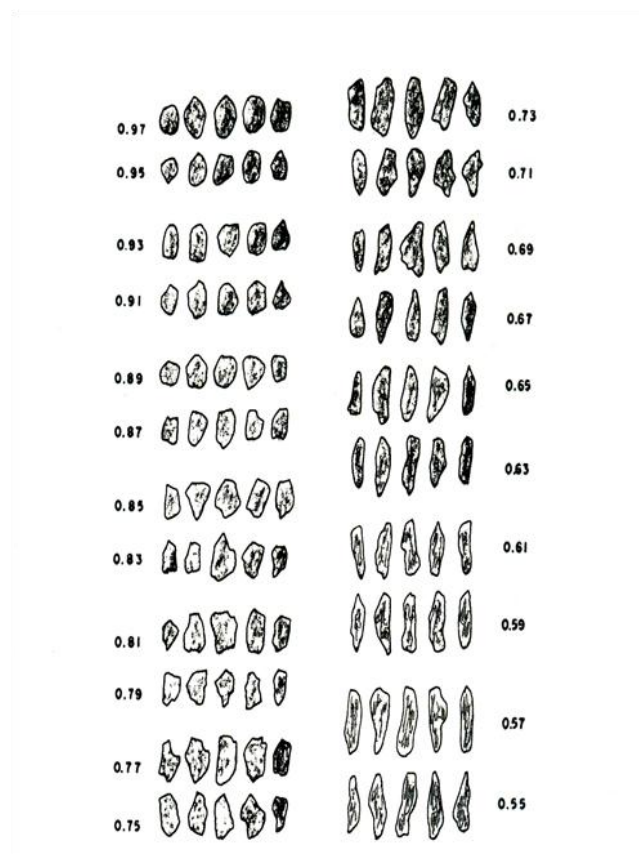
Comportamiento trazador capa a capa y a través de la longitud total

vf (1.0 mh-1)

v_f (0.75 mh ⁻¹)	t_p/ t_0	t_i/ t_0	t_b/ t_0	t_m/ t_0	E
	1.42	0.15	0.17	0.86	1.18
	0.81	0.03	0.09	0.42	0.19
	0.93	0.11	0.23	0.41	0.08
	1.34	0.19	0.72	1.45	0
	1.09	0.14	0.39	0.54	0.02

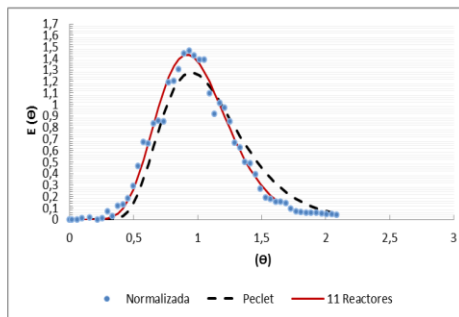
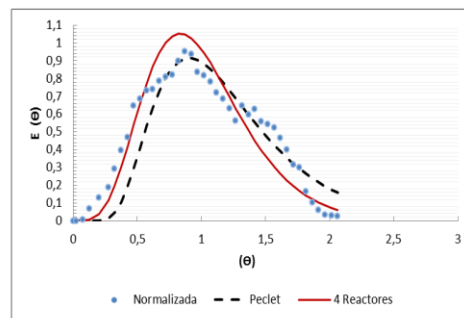
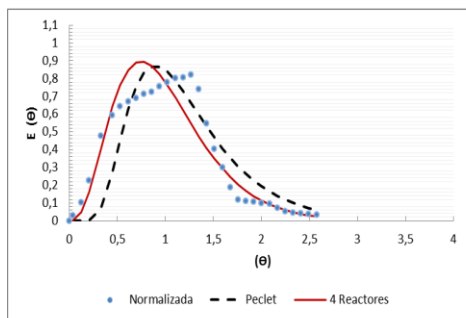
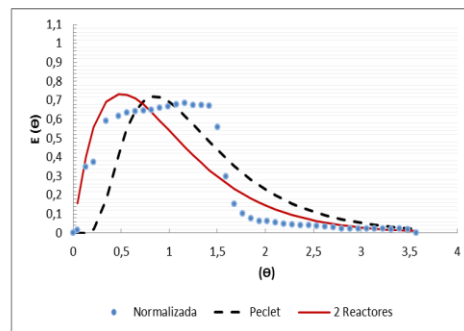
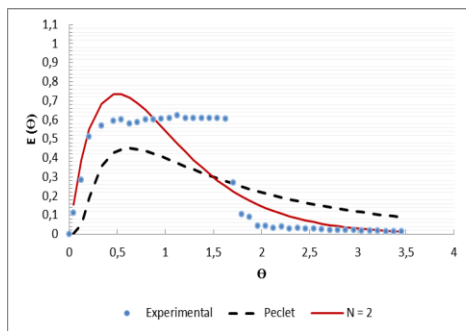


Anexo D. Escala de comparación visual de forma de los granos y valores de esfericidad
(Di Bernardo, 1993)

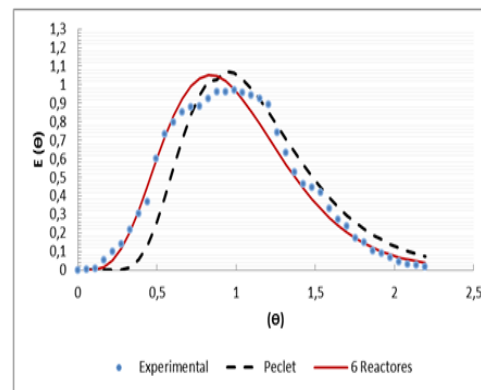
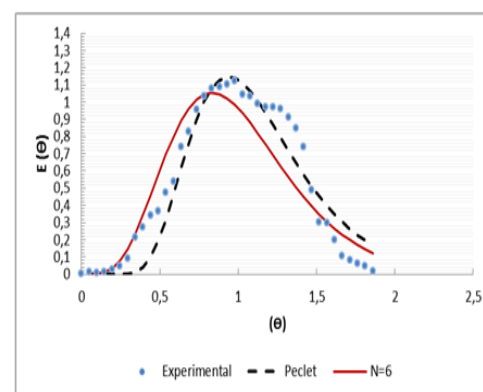
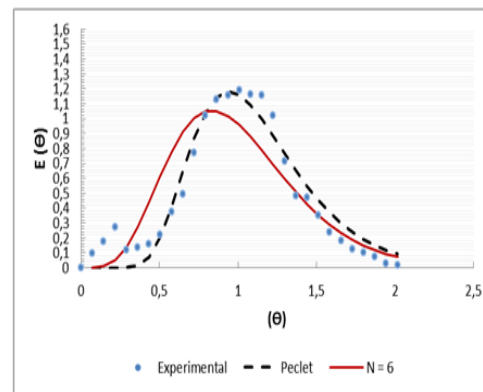
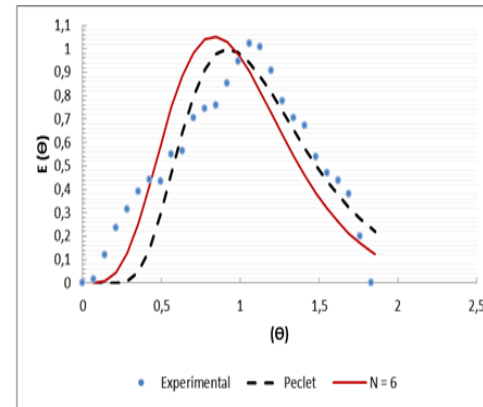
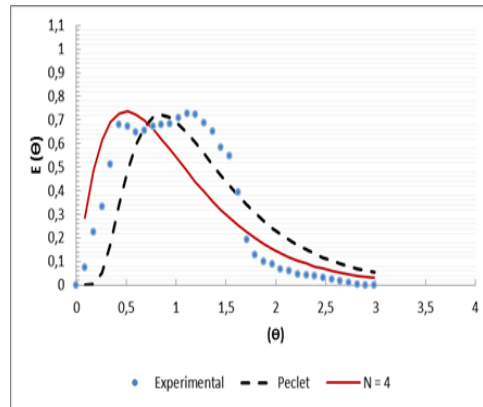


Anexo E. Curvas experimentales y curvas teóricas de los reactores completamente mezclados en serie

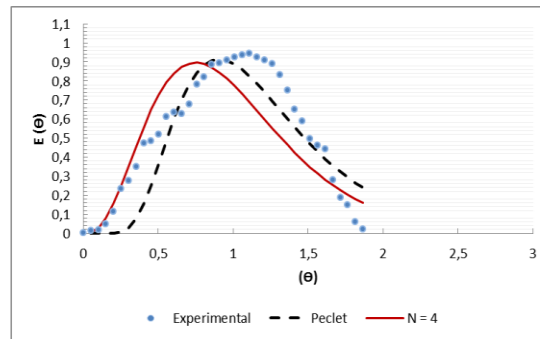
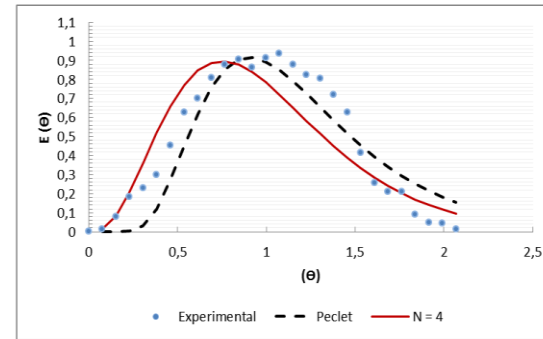
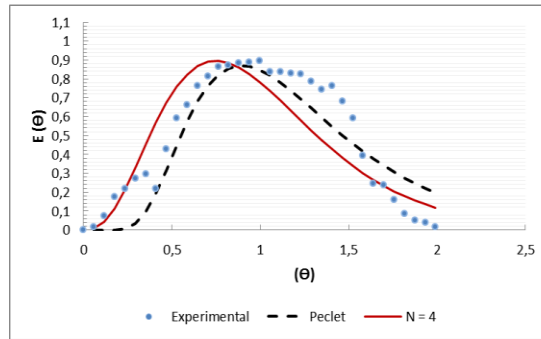
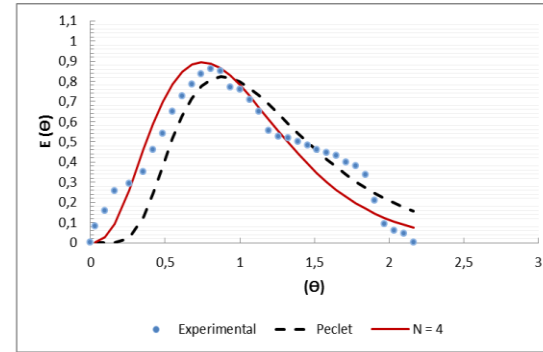
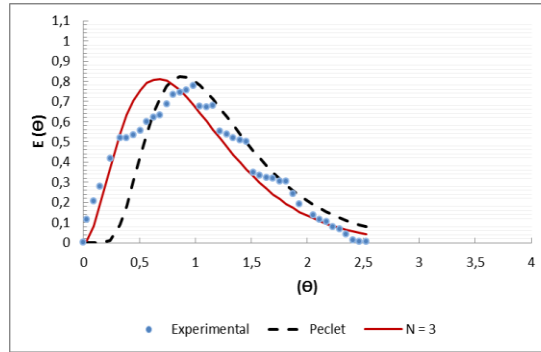
$$vf = 0.5 \text{ mh}^{-1}$$



$$vf = 0.75 \text{ mh}^{-1}$$



$$vf = 1.0 \text{ mh}^{-1}$$



Anexo F. Lectura de pérdida de carga

Vf = 0.5 m.h ⁻¹										
Lecturas de piezometro						Perdidas de carga (cm)				
Fecha	H1	H2	H3	H4	H5	H1-H2 (capa 1)	H2-H3 (capa 2)	H3-H4 (capa 3)	H4-H5 (capa 4)	R.C
26/08/2013	6	3,5	2,2	2,2	2	2,5	1,3	0	0,2	4
27/08/2013	8	3,9	2,4	2,4	2	4,1	1,5	0	0,4	6
28/08/2013	8	4,4	2,5	2,4	2,2	3,6	1,9	0,1	0,2	5,8
29/08/2013	8,2	4,4	2,5	2,4	2,2	3,8	1,9	0,1	0,2	6
30/08/2013	8,3	4,5	2,7	2,4	2,2	3,8	1,8	0,3	0,2	6,1
31/08/2013	8,2	4,5	2,6	2,3	2	3,7	1,9	0,3	0,3	6,2
01/09/2013	8,3	4,5	2,6	2,3	2,1	3,8	1,9	0,3	0,2	6,2
02/09/2013	8,5	4,5	2,6	2,3	2,2	4	1,9	0,3	0,1	6,3
03/09/2013	9	4,5	2,7	2,4	2,1	4,5	1,8	0,3	0,3	6,9
04/09/2013	9,2	5	2,7	2,4	2,2	4,2	2,3	0,3	0,2	7
05/09/2013	9,6	5,3	2,7	2,5	2,3	4,3	2,6	0,2	0,2	7,3
06/09/2013	9,8	5,5	3	2,9	2,3	4,3	2,5	0,1	0,6	7,5
07/09/2013	10,4	5,9	3,1	3	2,3	4,5	2,8	0,1	0,7	8,1
08/09/2013	10,6	6,1	3,2	3,1	2,4	4,5	2,9	0,1	0,7	8,2
09/09/2013	10,9	6,3	3,3	3,1	2,4	4,6	3	0,2	0,7	8,5
10/09/2013	11,8	6,5	3,3	3,2	2,4	5,3	3,2	0,1	0,8	9,4
11/09/2013	13,2	7	3,5	2,4	2	6,2	3,5	1,1	0,4	11,2
12/09/2013	14,4	7,7	3,8	2,5	2	6,7	3,9	1,3	0,5	12,4
13/09/2013	14,2	7,9	3,9	2,6	2,2	6,3	4	1,3	0,4	12
14/09/2013	15,1	8,3	3,9	2,5	2	6,8	4,4	1,4	0,5	13,1
15/09/2013	15,5	9,3	3,7	2,5	2,4	6,2	5,6	1,2	0,1	13,1

Vf = 0.75 m.h ⁻¹ Lecturas de piezometro Perdidas de carga (cm)											
Fecha	H1	H2	H3	H4	H5	H1-H2 (capa 1)	H2-H3 (capa 2)	H3-H4 (capa 3)	H4-H5 (capa 4)	R.C	
04/10/2013	6,4	5,2	4,1	2,6	2	1,2	1,1	1,5	0,6	4,4	
05/10/2013	7,2	5,2	4,3	2,6	2	2	0,9	1,7	0,6	5,2	
06/10/2013	7,8	6	4,5	2,7	2,1	1,8	1,5	1,8	0,6	5,7	
07/10/2013	8	6,3	4,8	2,7	2,1	1,7	1,5	2,1	0,6	5,9	
08/10/2013	8,1	6,4	4,8	2,7	2,2	1,7	1,6	2,1	0,5	5,9	
09/10/2013	8,2	6,4	4,9	2,7	2,2	1,8	1,5	2,2	0,5	6	
10/10/2013	8,3	6,5	5	2,8	2,2	1,8	1,5	2,2	0,6	6,1	
11/10/2013	8,4	6,5	5,2	2,2	1,9	1,9	1,3	3	0,3	6,5	
12/10/2013	9,3	6,9	5,2	2,8	2,3	2,4	1,7	2,4	0,5	7	
13/10/2013	10,3	7	5,5	2,8	2,3	3,3	1,5	2,7	0,5	8	
14/10/2013	11,5	7,5	5,9	3	2,3	4	1,6	2,9	0,7	9,2	
15/10/2013	12,8	7,8	6	3	2,3	5	1,8	3	0,7	10,5	
16/10/2013	13,5	8	6,2	3	2,3	5,5	1,8	3,2	0,7	11,2	
17/10/2013	14	8,2	6,2	3	2,3	5,8	2	3,2	0,7	11,7	
18/10/2013	14,6	8,7	6,7	3	2,3	5,9	2	3,7	0,7	12,3	
19/10/2013	15	9,4	7,4	3	2,3	5,6	2	4,4	0,7	12,7	
20/10/2013	15,2	10,6	8	3	2,3	4,6	2,6	5	0,7	12,9	
21/10/2013	16,5	11,3	8,7	3	2,3	5,2	2,6	5,7	0,7	14,2	

Vf = 1.0 m.h ⁻¹										
Lecturas de piezometro						Perdidas de carga (cm)				
Fecha	H1	H2	H3	H4	H5	H1-H2 (capa 1)	H2-H3 (capa 2)	H3-H4 (capa 3)	H4-H5 (capa 4)	R.C
16/09/2013	5,5	4,2	3,5	3	2	1,3	0,7	0,5	1	3,5
17/09/2013	9	5,2	3,7	4,2	2,3	3,8	1,5	-0,5	1,9	6,7
18/09/2013	11,2	8,7	7,8	6,6	2,4	2,5	0,9	1,2	4,2	8,8
19/09/2013	13,5	9	8,3	7,5	2,5	4,5	0,7	0,8	5	11
20/09/2013	13,7	10,2	8,5	8	2,5	3,5	1,7	0,5	5,5	11,2
21/09/2013	13,8	10,2	8,5	8	2,5	3,6	1,7	0,5	5,5	11,3
22/09/2013	13,9	10,4	8,6	8	2,5	3,5	1,8	0,6	5,5	11,4
23/09/2013	14,2	10,8	8,7	8	2,5	3,4	2,1	0,7	5,5	11,7
24/09/2013	14,5	11	9,3	8	2,5	3,5	1,7	1,3	5,5	12
25/09/2013	14,5	11,8	9,5	8	2,5	2,7	2,3	1,5	5,5	12
26/09/2013	15,6	13,5	9,6	8	2,5	2,1	3,9	1,6	5,5	13,1
27/09/2013	17,9	14,3	9,8	8,5	2,5	3,6	4,5	1,3	6	15,4
28/09/2013	19,7	14,6	10	8,5	2,5	5,1	4,6	1,5	6	17,2
29/09/2013	20,5	15	10,1	8,4	2,5	5,5	4,9	1,7	5,9	18
30/09/2013	20,6	15,2	10,2	6	2,3	5,4	5	4,2	3,7	18,3
01/10/2013	22,5	15,5	10,3	4	2,3	7	5,2	6,3	1,7	20,2
02/10/2013	25,5	16	10,8	4,8	2,3	9,5	5,2	6	2,5	23,2
03/10/2013	25,6	17,2	10,3	4,3	2,3	8,4	6,9	6	2	23,3
04/10/2013	30	19,8	12,5	5,4	2,3	10,2	7,3	7,1	3,1	27,7

Anexo G. Lectura de Turbiedad en campo

Equipo : 2100Q – HACH			Vf 0.5 m.h ⁻¹					
Día	Hora	Fecha	P1	P2	P3	P4	P5	Salida
1	09:30	26/08/2013	46,3	36,8	25,4	24,6	19,8	15
	15:20		25,7	23,4	20,8	16	13,6	12
	17:00		29,1	27,5	24,3	19,1	14,3	13,5
2	10:30	27/08/2013	23,7	23,5	23	15,3	12,1	11
	14:00		24,2	20,5	19,8	16,3	12,6	11,2
3	08:30	28/08/2013	36,1	29,1	26,1	19,1	16	14
	09:30		28	27,7	27	18,9	14,8	12,6
	10:30		28,1	26,9	25,4	18,6	14,2	13,2
	11:30		28,2	25,2	24,5	16,5	13	12
	12:30		27,2	25,8	24,1	17,8	13,1	12,5
4	09:15	29/08/2013	21,8	20,2	24,5	15	11,2	10,6
	11:30		22,7	20,7	24,7	14,3	11	9,4
	14:30		22,7	21,2	19	13,8	10,2	9,4
5	13:00	30/08/2013	17,8	17,2	16,4	14,9	12,5	10,3
	14:00		22,7	20,7	24,7	14,3	11	9,4
6	08:30	31/08/2013	32,5	31,3	26,3	18,6	14,5	12,8
	09:30		32,9	30,4	27,7	24,5	17,2	14,6
	11:00		30,5	29,6	25,3	24,1	17,6	13,9
7	08:20	01/09/2013	17,6	16,7	15,4	12	9,8	8,2
	09:30		17,8	17,2	16,4	14,9	12,5	10,3
	10:10		18,6	17,9	17,6	14,4	13,5	11,6
8	14:00	02/09/2013	16,1	15,2	13,3	9,1	7,2	6,6
	15:00		16,5	15	12,6	9,7	7,8	6,7
	16:00		17	15,2	13,1	9,8	7,9	6,5
9	09:00	03/09/2013	22,8	21,1	18,4	13,7	8,1	7,2
	10:00		14,3	14,1	13,5	9,8	7,7	7,1
	11:00		17,5	16,7	15,4	14,8	12,6	10,3

Equipo : 2100Q – HACH			Vf 0.5 m.h ⁻¹					
Día	Hora	Fecha	P1	P2	P3	P4	P5	Salida
10	10:00	04/09/2013	14,5	12,3	11,9	8,3	6,8	6
	11:00		13,8	12,5	12,3	8,2	6,8	6,1
	12:00		12,5	11,7	10,8	9,4	6,7	6,2
11	09:00	05/09/2013	16,8	15,2	14,4	10	8	6,8
	10:00		16,1	15,4	13,8	10,1	7,8	6,9
	11:00		16,3	15,6	13,7	10,1	8,3	7,3
12	08:00	06/09/2013	46,9	41,7	16,7	10,1	9,3	7,1
	09:00		44,3	40,8	26,5	12,9	10,5	8,7
	10:00		17,3	15,6	15,3	10,1	8,3	7,4
13	09:00	07/09/2013	41,4	26,8	24,3	16,5	12,6	10,6
	10:00		22,4	21,1	18,7	14,3	8,4	8,1
14	09:00	08/09/2013	28,5	24,6	22,3	16,8	14,3	12,1
	10:00		32,3	28,2	25,5	19,6	17,4	11,2
15	11:30	09/09/2013	26,7	22,9	19,6	15,3	10,8	8,8
	12:30		25,2	23,1	18,4	16,4	13,2	10,8
16	11:30	10/09/2013	32,9	29,5	27,8	15,6	12,5	9
	12:30		34	29,8	26,4	17,9	13,2	11,1
17	14:00	11/09/2013	40,5	38,6	35,3	23,6	20,2	16
	15:00		13,8	12,5	12,3	8,2	6,8	6,1
	16:00		22,8	21,1	18,4	13,7	8,1	7,2
18	09:00	12/09/2013	22,4	21,1	18,7	14,3	8,4	8,1
	10:00		28,5	24,6	22,3	16,8	14,3	12,1
19	14:00	13/09/2013	17,3	15,6	15,3	10,1	8,3	7,4
	15:00		41,4	26,8	24,3	16,5	12,6	10,6
	16:00		16,3	15,6	13,7	10,1	8,3	7,3
20	08:00	14/09/2013	25,2	23,1	18,4	16,4	13,2	10,8
21	10:30	15/09/2013	40,5	38,6	35,3	23,6	20,2	16
	11:30		38,7	37,6	34,9	23,3	19,2	16,6

Equipo : 2100Q – HACH			Vf 0.75 m.h ⁻¹					
Día	Hora	Fecha	P1	P2	P3	P4	P5	Salida
1	07:00	04/10/2013	60,2	52,8	47,1	43,3	35	25,4
	07:15	04/10/2013	54,4	54,4	48,9	40,4	37,2	23,9
2	10:30	05/10/2013	82	64,3	56	34,8	25,4	20,3
	11:30	05/10/2013	80,4	65,1	60	35,2	28,4	19,6
	12:30	05/10/2013	79,5	63,9	58,5	34,6	27,3	19,2
3	10:00	06/10/2013	67,3	65,3	60,6	45,1	36,3	24,1
	11:00	06/10/2013	60,2	55,8	60,1	43,3	35	25,4
	12:00	06/10/2013	56,4	54,4	50,9	40,4	37,2	23,9
4	14:00	07/10/2013	19,2	16,4	14,4	11,2	8,56	7,71
	15:00	07/10/2013	20,4	16,5	14,5	10,1	8,05	7,05
	16:00	07/10/2013	21,1	16	14,3	9,81	7,16	7,05
5	14:30	08/10/2013	20,4	18,6	15,9	13,5	10,6	9,7
	15:30	08/10/2013	19,3	18,1	16,8	10,8	6,64	6,3
	16:00	08/10/2013	20,5	19,3	17,6	12,4	10,6	9,96
	16:30	08/10/2013	20,4	18,7	16	13	10,6	9,7
6	14:30	09/10/2013	19,8	18,5	17,3	11,2	7,1	6,7
	15:30	09/10/2013	18,6	17,4	16,5	13,4	10,3	9,43
	16:30	09/10/2013	19,4	17,5	15,7	12,2	9,5	7,4
7	15:30	10/10/2013	13,6	12,9	12,3	8,08	5,39	5,41
	16:00	10/10/2013	14,8	13,5	12,4	8,3	5,8	5,63
	16:30	10/10/2013	15,9	13	12,6	9	6	5,89
8	14:00	11/10/2013	20,5	19,8	15,2	13,1	10,6	9,4
	15:00	11/10/2013	19,8	17,6	16,3	12,5	9,82	8,6
9	12:00	12/10/2013	28,6	30,1	18,5	14,3	9,92	8,5
10	11:30	13/10/2013	27,6	24,9	19	14,2	8,6	7,5

Equipo : 2100Q – HACH			Vf 0.75 m.h ⁻¹					
Día	Hora	Fecha	P1	P2	P3	P4	P5	Salida
11	14:30	14/10/2013	20,2	18,3	15,8	10,1	6,3	5,9
	15:30	14/10/2013	20,5	18,6	16,5	12,3	9,4	7
	16:30	14/10/2013	21,4	19,5	16,7	14,5	10,5	8,3
12	14:00	15/10/2013	67,5	61,1	56,5	30,2	23,8	19,6
	15:00	15/10/2013	54,3	48,6	45,3	39	28,3	20,9
	16:00	15/10/2013	50,4	46,5	40,7	36,8	30,4	21
13	14:00	16/10/2013	40,3	36,8	25,3	26,6	20,2	16
	15:30	16/10/2013	36,1	29,4	26,2	19,8	16	14
	16:30	16/10/2013	28	27,4	27	18,4	18,3	17,6
14	14:00	17/10/2013	89,1	79	71	40,5	28,3	26,5
	15:00	17/10/2013	87	80	70,3	40,1	30	20,7
	16:00	17/10/2013	70	75,2	65,1	39,8	31,8	21,5
	17:00	17/10/2013	65	59	48,5	39,6	30,1	20,4
15	14:30	18/10/2013	49,1	40,4	34,5	23,2	17,6	15,4
	15:30	18/10/2013	48,2	39,6	36	25	16,7	12,1
	16:30	18/10/2013	47,9	40,2	35,7	24,3	18,3	13,5
16	07:00	19/10/2013	39,4	34,3	29,8	19,3	18,6	13,4
	07:30	19/10/2013	36,7	35,9	30,3	20,5	17,4	12,6
	08:00	19/10/2013	35,4	34,3	27,4	20,8	18,2	13,2
17	07:30	20/10/2013	35,5	30,2	28,6	19,3	15,3	10,3
	08:30	20/10/2013	36,3	31,5	24,6	18,3	14,9	10,2
	09:00	20/10/2013	34	30	25,4	17,9	15,4	9,4
18	11:30	21/10/2013	215	200	187	157	123	100
	12:30	21/10/2013	98	87	72	68	54	38
	13:00	21/10/2013	28,3	20,9	19,5	15,4	13,2	10

Equipo : 2100Q – HACH				Vf 1.0 m.h ⁻¹				
Día	Hora	Fecha	P1	P2	P3	P4	P5	Salida
1	19:00	14/09/2013	24,5	18,8	16,4	13,4	11,3	9,8
2	11:00	15/09/2013	21,2	19,6	15,6	12,3	11,7	8,5
	12:00	15/09/2013	20,3	19,3	16,8	13,4	11,6	6,8
3	15:30	16/09/2013	21,6	18,1	15,8	10,9	9,4	7,5
4	14:00	17/09/2013	23,5	19,2	17,6	14,5	10,2	7,3
	15:00	17/09/2013	24,1	19,6	17,1	10,9	11,5	10,1
	16:00	17/09/2013	24,5	18,8	16,4	13,4	11,3	9,8
5	15:30	18/09/2013	42,8	41,9	39,1	30,6	28,8	10,8
	16:00	18/09/2013	41,7	40,2	37,5	30,2	26,7	12,9
	17:00	18/09/2013	40,4	39,4	36,4	29,6	25,6	11,8
6	14:10	19/09/2013	35	33	27,1	18,2	15,7	13,4
	15:00	19/09/2013	36	30,7	29,5	24,8	18,8	13
	16:00	19/09/2013	23,5	18,5	17,6	15,4	13,2	9,8
7	15:50	20/09/2013	36	35,7	32,5	28,8	29,8	14
	16:50	20/09/2013	43,7	42,7	40,3	31,7	27,8	15
	17:50	20/09/2013	44,3	42,6	40,1	26	25,2	15
8	11:00	21/09/2013	19,1	18,5	17,6	15,4	13,2	12,5
	12:00	21/09/2013	18,6	17,5	15,7	13,3	12,4	11,6
	13:00	21/09/2013	17,9	16,8	15,4	13,7	11,9	10,8
9	11:00	22/09/2013	18,9	18,3	16,1	15,4	13,2	12,9
	12:00	22/09/2013	16,6	16,3	15,5	14,7	13,3	11,8
	13:00	22/09/2013	19,4	17,5	16,6	15,8	13,9	11,7
10	07:00	23/09/2013	12,3	12,1	11,9	11,7	10,6	8,9
	08:00	23/09/2013	11,7	11,4	10,9	8,2	7,2	7,2
	09:00	23/09/2013	11,9	11,9	11,2	8,2	7,3	7
	10:00	23/09/2013	11,8	11,3	10,6	8,5	7,3	6,8
11	14:30	24/09/2013	12,3	10,5	9,7	6,8	5,9	4,8
	15:30	24/09/2013	10,6	9,6	9	6,5	5,7	4,8
	16:30	24/09/2013	11,3	9,6	9,2	6,4	5,9	4,5

Equipo : 2100Q – HACH				Vf 1.0 m.h ⁻¹				
Día	Hora	Fecha	P1	P2	P3	P4	P5	Salida
12	14:00	25/09/2013	15,1	12,5	9,2	8,8	7,1	6,8
	15:00	25/09/2013	14,9	12,3	9,2	8,9	7,3	6,5
	16:00	25/09/2013	15,3	12,4	9,3	8,1	7,6	6,8
13	14:00	26/09/2013	20,3	19,3	16,8	13,4	11,6	6,8
	15:00	26/09/2013	21,6	18,1	15,8	10,9	9,4	7,5
	16:00	26/09/2013	23,5	19,2	17,6	14,5	10,2	7,3
14	14:00	27/09/2013	24,1	19,6	17,1	10,9	11,5	10,1
	15:00	27/09/2013	24,5	18,8	16,4	13,4	11,3	9,8
	16:00	27/09/2013	23,3	17,1	15,3	12,3	10,9	8
15	09:00	28/09/2013	39,6	31,3	27,1	18,2	15,7	13,4
	10:00	28/09/2013	40,3	35,5	30,4	18,6	16,5	13,3
	10:30	28/09/2013	35,1	34,2	26,8	18,7	15	13,1
16	12:00	29/09/2013	40,5	38,6	30,1	20,6	17,4	12
	13:00	29/09/2013	41,2	39,3	29,4	21,3	18	13,4
	14:00	29/09/2013	76	55,4	54,3	50,2	26,4	15
17	15:00	30/09/2013	83,6	68,2	67,5	45,2	41	19
	16:00	30/09/2013	82,1	67,6	67,3	40,4	39,7	19
	17:00	30/09/2013	84,3	69	68,3	46,8	32	19
18	14:00	01/10/2013	94,2	83,2	72	43,4	35,6	19
	15:00	01/10/2013	93,7	80,3	71,8	40,2	34,7	19
	16:00	01/10/2013	90,2	80,1	70,5	41,3	32,6	19
19	14:30	02/10/2013	28,4	25,4	24,2	14,1	13,5	10,9
	15:30	02/10/2013	32,4	26	23	17	14	9
	16:30	02/10/2013	35,1	34,2	26,8	18,7	15	13,1
20	14:15	03/10/2013	62,3	53,8	52,9	26,2	15,9	13,2
	14:30	03/10/2013	60,1	53,5	51,4	26,3	15,7	13,3
	15:00	03/10/2013	55,4	54,3	50,2	26,4	15	13,4
	15:30	03/10/2013	50,4	50,1	48,6	26,1	16	13,5
21	16:00	04/10/2013	75,3	54,6	46,1	18,3	15	12,6
	16:30	04/10/2013	73	60	46,5	18,2	15,5	13

Anexo H. Calculo de k

vf 0.5	SST (mg/l) Volumen de muestra (100 ml)	Entrada	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Salida	SST C/Co1 %	SST C/Co2 %	SST C/Co3 %	SST C/Co4 %	SST Net	kT (tanques en serie)	T ret (seg)	k	1+kt	C/Co Calculado
0	Dia 0																
1	Dia 1	46,3	36,8	25,4	24,6	19,8	15,0	0,79	0,69	0,97	0,80	0,324	1,19306364	3018	0,00040	1,11931	0,3240
2	Dia 2	23,7	23,5	23,0	15,3	12,1	11,0	0,99	0,98	0,67	0,79	0,464	0,79780714	3018	0,00026	1,07978	0,4641
3	Dia 3	36,1	29,1	26,1	19,1	16,0	14,0	0,81	0,90	0,73	0,84	0,388	0,993549	3018	0,00033	1,09935	0,3878
4	Dia 4	21,8	20,2	24,5	15,0	11,2	10,6	0,93	1,21	0,61	0,75	0,486	0,7476883	3018	0,00025	1,07477	0,4862
5	Dia 5	17,8	17,2	16,4	14,9	12,5	10,3	0,97	0,95	0,91	0,84	0,579	0,56229463	3018	0,00019	1,05623	0,5787
6	Dia 6	32,5	31,3	26,3	18,6	14,5	12,8	0,96	0,84	0,71	0,78	0,394	0,97658738	3018	0,00032	1,09766	0,3938
7	Dia 7	17,6	16,7	15,4	12,0	9,8	8,2	0,95	0,92	0,78	0,82	0,466	0,79368853	3018	0,00026	1,07937	0,4659
8	Dia 8	16,1	15,2	13,3	9,1	7,2	6,6	0,94	0,88	0,68	0,79	0,411	0,93106412	3018	0,00031	1,09311	0,4106
9	Dia 9	22,8	21,1	18,4	13,7	8,1	7,2	0,93	0,87	0,74	0,59	0,317	1,21862845	3018	0,00040	1,12186	0,3167
10	Dia 10	14,5	12,3	11,9	8,3	6,8	6,0	0,85	0,97	0,70	0,83	0,413	0,92431257	3018	0,00031	1,09243	0,4131
11	Dia 11	16,8	15,2	14,4	10,0	8,0	6,8	0,90	0,95	0,69	0,80	0,405	0,94501137	3018	0,00031	1,09450	0,4054
12	Dia 12	46,9	41,7	16,7	10,1	9,3	7,1	0,89	0,40	0,60	0,92	0,152	2,07450359	3018	0,00069	1,20745	0,1518
13	Dia 13	41,4	26,8	24,3	16,5	12,6	10,6	0,65	0,91	0,68	0,76	0,256	1,45959971	3018	0,00048	1,14596	0,2560
14	Dia 14	28,5	24,6	22,3	16,8	14,3	12,1	0,86	0,91	0,75	0,85	0,425	0,89446603	3018	0,00030	1,08945	0,4246
15	Dia 15	26,7	22,9	19,6	15,3	10,8	8,8	0,86	0,86	0,78	0,71	0,329	1,17512111	3018	0,00039	1,11751	0,3292
16	Dia 16	32,9	29,5	27,8	15,6	12,5	9,0	0,90	0,94	0,56	0,80	0,274	1,38148515	3018	0,00046	1,13815	0,2742
17	Dia 17	40,5	38,6	35,3	23,6	20,2	16	0,95	0,91	0,67	0,86	0,395	0,97320529	3018	0,00032	1,09732	0,3951
n=10		Mediana		15,2	12,1	10,1	0,9	0,9	0,7	0,8	0,4	k 0,00035					
Eficiencia										0,62							

vf 0.75	SST (mg/l) Volumen de muestra (100 ml)	Entrada	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Salida	SST C/Co1 %	SST C/Co2 %	SST C/Co3 %	SST C/Co4 %	SST Net	kT (tanques en serie)	T ret (seg)	k	1+kt	C/Co Calculado
0	Dia 0																
1	Dia 1	80,40	65,10	60,00	35,20	28,40	19,60	0,81	0,92	0,59	0,81	0,244	1,59133074	3282	0,00048	1,15913	0,2284
2	Dia 2	79,50	63,90	58,50	34,60	27,30	19,20	0,80	0,92	0,59	0,79	0,242	1,60318516	3282	0,00049	1,16032	0,2261
3	Dia 3	67,30	65,30	60,60	45,10	36,30	24,10	0,97	0,93	0,74	0,80	0,358	1,12006985	3282	0,00034	1,11201	0,3459
4	Dia 4	19,20	16,40	14,40	11,20	8,56	7,71	0,85	0,88	0,78	0,76	0,402	0,98541789	3282	0,00030	1,09854	0,3907
5	Dia 5	20,4	18,6	15,9	13,5	10,6	9,7	0,91	0,85	0,85	0,79	0,475	0,79142625	3282	0,00024	1,07914	0,4669
6	Dia 6	19,8	18,5	17,3	11,2	7,1	6,7	0,93	0,94	0,65	0,63	0,338	1,1875848	3282	0,00036	1,11876	0,3256
7	Dia 7	13,6	12,9	12,3	8,1	5,4	5,4	0,95	0,95	0,66	0,67	0,398	0,99640365	3282	0,00030	1,09964	0,3868
8	Dia 8	20,5	19,8	15,2	13,1	10,6	9,4	0,97	0,77	0,86	0,81	0,459	0,83264597	3282	0,00025	1,08326	0,4494
9	Dia 9	20,2	18,3	15,8	10,1	6,3	5,9	0,91	0,86	0,64	0,62	0,292	1,36604685	3282	0,00042	1,13660	0,2779
10	Dia 10	20,5	18,6	16,5	12,3	9,4	7,0	0,91	0,89	0,75	0,76	0,341	1,17674013	3282	0,00036	1,11767	0,3287
11	Dia 11	67,5	61,1	56,5	30,2	23,8	19,6	0,91	0,92	0,53	0,79	0,290	1,37325409	3282	0,00042	1,13733	0,2762
12	Dia 12	40,3	36,8	25,3	26,6	20,2	16,0	0,91	0,69	1,05	0,76	0,397	0,99866857	3282	0,00030	1,09987	0,3860
13	Dia 13	89,1	79,0	71,0	40,5	28,3	26,5	0,89	0,90	0,57	0,70	0,297	1,34384027	3282	0,00041	1,13438	0,2834
14	Dia 14	49,1	40,4	34,5	23,2	17,6	15,4	0,82	0,85	0,67	0,76	0,314	1,27910603	3282	0,00039	1,12791	0,3001
15	Dia 15	39,4	34,3	29,8	19,3	18,6	13,4	0,87	0,87	0,65	0,96	0,340	1,18152187	3282	0,00036	1,11815	0,3273
16	Dia 16	35,5	30,2	28,6	19,3	15,3	10,3	0,85	0,95	0,67	0,79	0,290	1,37422592	3282	0,00042	1,13742	0,2759
17	Dia 17	27	27	21,5	12,6	9,7	8	1,00	0,80	0,59	0,77	0,296	1,34846923	3282	0,00041	1,13485	0,2822
18	Dia 18	49	42,6	34,2	19	15,2	14	0,87	0,80	0,56	0,80	0,286	1,39314558	3282	0,00042	1,13931	0,2714
19	Dia 19	54	50	49	28	18	15	0,93	0,98	0,57	0,64	0,278	1,42793909	3282	0,00044	1,14279	0,2632
20	Dia 20	28,2	25,2	18,4	13,7	8,1	7,21	0,89	0,73	0,74	0,59	0,256	1,5313048	3282	0,00047	1,15313	0,2406
	n=6			Mediana	18,3	13,7	11,6	0,9	0,9	0,7	0,7	0,3		k	0,00038		
								Eficiencia	0,66								

vf 1.0	SST (mg/l) Volumen de muestra (100 ml)	Entrada	Capa 1	Capa 2	Capa 3	Capa 4	Salida	SST C/Co1 %	SST C/Co2 %	SST C/Co3 %	SST C/Co4 %	SST Net	kt (tanques en serie)	T ret (min)	k	1+kt	C/Co Calculado
0	Dia 0																
1	Dia 1	42,80	41,90	39,10	30,60	28,80	10,8	0,98	0,93	0,78	0,94	0,252	1,64371397	2382	0,00069	1,16437	0,2183
2	Dia 2	41,70	40,20	37,50	30,20	26,70	12,9	0,96	0,93	0,81	0,88	0,309	1,36347891	2382	0,00057	1,13635	0,2785
3	Dia 3	40,4	39,4	36,4	29,6	25,6	11,8	0,98	0,92	0,81	0,86	0,292	1,44107648	2382	0,00060	1,14411	0,2602
4	Dia 4	36,0	35,7	32,5	28,8	29,8	14,0	0,99	0,91	0,89	1,03	0,389	1,06528175	2382	0,00045	1,10653	0,3634
5	Dia 5	43,7	42,7	40,3	31,7	27,8	15,0	0,98	0,94	0,79	0,88	0,343	1,22585717	2382	0,00051	1,12259	0,3146
6	Dia 6	44,3	42,6	40,1	26,0	25,2	15,0	0,96	0,94	0,65	0,97	0,339	1,24370327	2382	0,00052	1,12437	0,3097
7	Dia 7	19,1	18,5	17,6	15,4	13,2	12,5	0,97	0,95	0,88	0,86	0,654	0,44724269	2382	0,00019	1,04472	0,6456
8	Dia 8	18,9	18,3	16,1	15,4	13,2	12,9	0,97	0,88	0,96	0,86	0,683	0,40076335	2382	0,00017	1,04008	0,6751
9	Dia 9	12,3	12,1	11,9	11,7	10,6	8,9	0,98	0,98	0,98	0,91	0,724	0,33699346	2382	0,00014	1,03370	0,7179
10	Dia 10	12,3	10,5	9,7	6,8	5,9	4,8	0,85	0,92	0,70	0,87	0,389	1,06351838	2382	0,00045	1,10635	0,3640
11	Dia 11	15,1	12,5	9,2	8,8	7,1	6,8	0,83	0,74	0,96	0,80	0,450	0,8846875	2382	0,00037	1,08847	0,4284
12	Dia 12	20,3	19,3	16,8	13,4	11,6	6,8	0,95	0,87	0,80	0,87	0,333	1,26754261	2382	0,00053	1,12675	0,3032
13	Dia 13	24,1	19,6	17,1	10,9	11,5	10,1	0,81	0,87	0,64	1,06	0,419	0,97145953	2382	0,00041	1,09715	0,3957
14	Dia 14	39,6	31,3	27,1	18,2	15,7	13,4	0,79	0,87	0,67	0,86	0,338	1,24454225	2382	0,00052	1,12445	0,3094
15	Dia 15	40,5	38,6	30,1	20,6	17,4	12,0	0,95	0,78	0,68	0,84	0,296	1,42161202	2382	0,00060	1,14216	0,2647
16	Dia 16	83,6	68,2	67,5	45,2	41	19	0,82	0,99	0,67	0,91	0,227	1,79326187	2382	0,00075	1,17933	0,1922
17	Dia 17	94,2	83,2	72	43,4	35,6	19	0,88	0,87	0,60	0,82	0,202	1,96876275	2382	0,00083	1,19688	0,1658
18	Dia 18	28,4	25,4	24,2	14,1	13,5	10,9	0,89	0,95	0,58	0,96	0,384	1,08198	2382	0,00045	1,10820	0,3580
19	Dia 19	62,3	53,8	52,9	26,2	15,9	13,2	0,86	0,98	0,50	0,61	0,212	1,89574268	2382	0,00080	1,18957	0,1762
20	Dia 20	75,3	54,6	46,1	18,3	15	12,6	0,73	0,84	0,40	0,82	0,167	2,2541184	2382	0,00095	1,22541	0,1310
21	Dia 21	27,6	24,9	19	14,2	8,6	7,5	0,90	0,76	0,75	0,61	0,272	1,54015539	2382	0,00065	1,15402	0,2387
	n=4			Mediana	21,9	19,0	11,9	0,9	0,9	0,7	0,9	0,4		k	0,00053		
								Eficiencia	0,63								

Anexo I

Capa 1					
Numero de Malla	Apertura (mm)	Peso retenido (g)	% de retenido	% de acumulado	% que pasa
1 1/2 "	38,10	0	0	0	100
1"	25,40	0	0	0	100
3/4"	19,1	0	0	0	100
1/2"	12,7	0	0	0	100
1/4"	6,4	576,6	57,66	57,66	42,34
1/8"	3,2	352,3	35,23	92,89	7,11
Base		71,1	7,11	100	0
		1000			

Capa 2					
Numero de Malla	Apertura (mm)	Peso retenido	% de retenido	% de acumulado	% que pasa
1 1/2 "	38,10	0	0	0	100
1"	25,40	0	0	0	100
3/4"	19,1	0	0	0	100
1/2"	12,7	22,3	2,23	2,23	97,77
1/4"	6,4	925,2	92,52	94,75	5,25
Base		52,5	5,25	100	0
		1000			

Capa 3					
Numero de Malla	Apertura (mm)	Peso retenido	% de retenido	% de acumulado	% que pasa
1 1/2 "	38,10	0	0	0	100
1"	25,40	0	0	0	100
3/4"	19,1	196,3	19,63	19,63	80,37
1/2"	12,7	736,3	73,63	93,26	6,74
1/4"	6,4	67,4	6,74	100	0
Base		0	0	100	0
		1000			

Capa 4					
Numero de Malla	Apertura (mm)	Peso retenido	% de retenido	% de acumulado	% que pasa
1 1/2 "	38,10	0	0	0	100
1"	25,40	84	8,4	8,4	91,6
3/4"	19,1	715	71,5	79,9	20,1
1/2"	12,7	201	20,1	100	0
1/4"	6,4	0	0	0	0
Base		0	0	100	0
		1000			

